

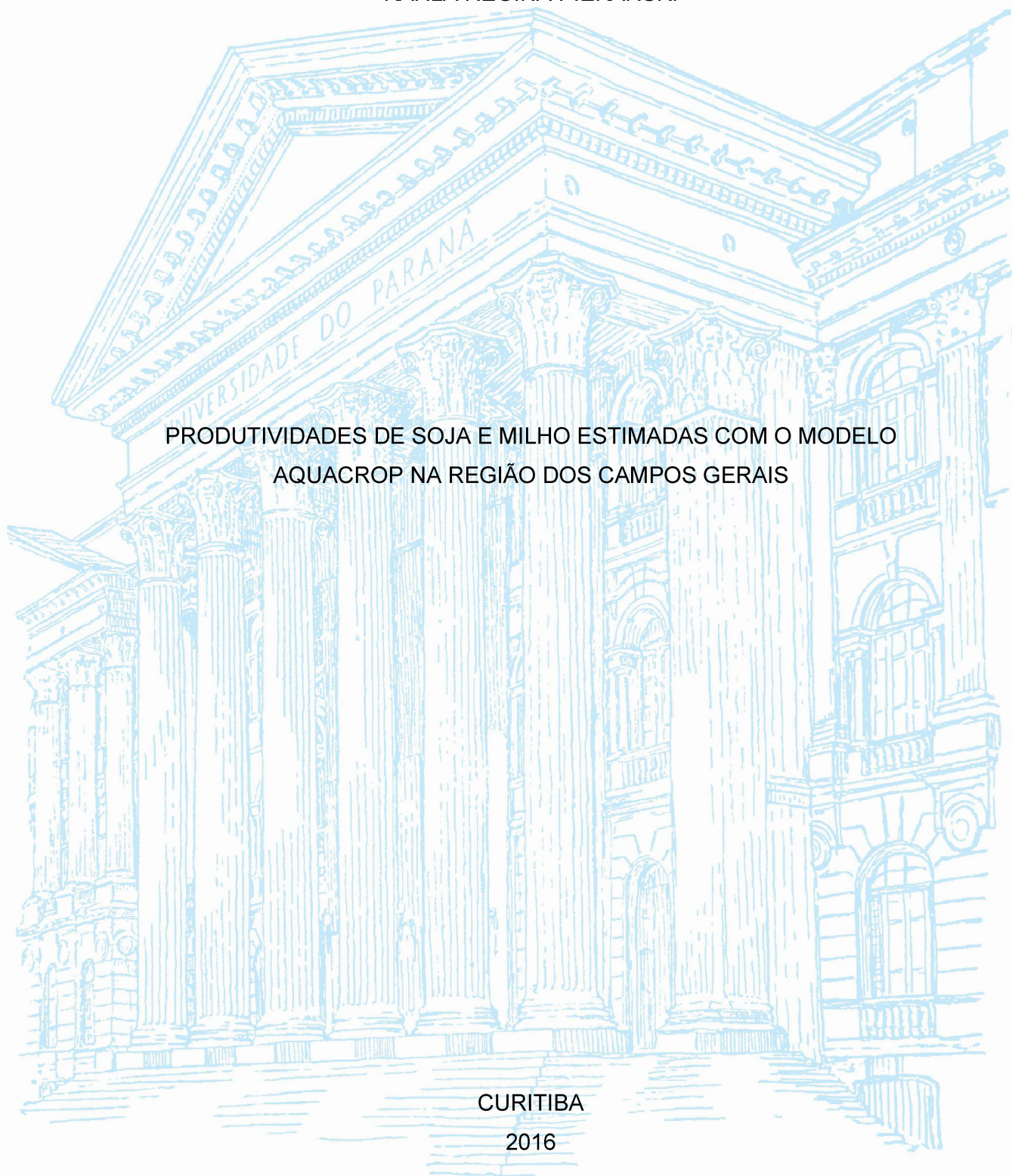
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KARLA REGINA PIEKARSKI

PRODUTIVIDADES DE SOJA E MILHO ESTIMADAS COM O MODELO
AQUACROP NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS

CURITIBA

2016



KARLA REGINA PIEKARSKI

PRODUTIVIDADES DE SOJA E MILHO ESTIMADAS COM O MODELO
AQUACROP NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Qualidade, Manejo e Conservação do Solo e da Água, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza.

CURITIBA

2016

P613p Piekarski, Karla Regina
Produtividades de soja e milho estimadas com o modelo
AquaCrop na região dos Campos Gerais / Karla Regina Piekarski.
- Curitiba, 2016.
98 p.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná.
Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo.

Orientador: Jorge Luiz Moretti de Souza

1. Soja – Fatores climáticos – Métodos de simulação. 2. Milho
– Fatores climáticos – Métodos de simulação. 3. Produtividade
agrícola. I. Souza, Jorge Luiz Moretti de. II. Título. III.
Universidade Federal do Paraná.

CDU 631.523:633.15



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
Mestrado e Doutorado




PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **KARLA REGINA PIEKARSKI**, intitulada: **"Produtividades de soja e milho estimadas com o modelo AquaCrop na região dos Campos Gerais"**, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela **"APROVAÇÃO"** da referida Dissertação. A candidata atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 30 de maio de 2016.


Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, Presidente


Dr. Rodrigo Yotti Tsukahara, Iº. Examinador


Prof. Dr. Roberto Rezende, IIº. Examinador


Prof. Dr. João Carlos Bessalhok Filho, IIIº. Examinador

AGRADECIMENTOS

- Agradeço primeiramente a Deus pela concessão de disposição, sabedoria e saúde que me permitiram chegar até aqui.
- Aos meus pais e família que me ajudaram e incentivaram das melhores formas em todos os momentos, principalmente incentivando ao estudo.
- À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-graduação em Ciências do Solo, por concederem o curso de mestrado e pelo esforço em proporcionar boas condições de estudo.
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, pela indispensável orientação, ensinamentos, críticas, sugestões e amizade, que contribuíram em minha formação e para o desenvolvimento da presente dissertação.
- À Fundação ABC – Pesquisa e Desenvolvimento Agropecuário, pelo fornecimento de dados essenciais ao desenvolvimento do presente estudo. Em especial ao pesquisador e coordenador do setor de Agrometeorologia, Dr. Rodrigo Yoiti Tsukahara, pela disposição, orientação e auxílio na coleta dos dados. Também ao pesquisador Edson Giovanni Kochinski e demais funcionários que muito se dispuseram e contribuíram para a coleta de dados.
- Aos funcionários do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola e Laboratório de Manejo de Bacias Hidrográficas da UFPR, e ao professor Nivaldo E. Rizzi, pelo auxílio e disposição de equipamentos e laboratórios para análises realizadas neste trabalho.
- Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e outros programas, pelos ensinamentos que nos instigam a busca pelo conhecimento.
- Aos meus colegas e amigos da turma de mestrado e doutorado dos anos de 2014 a 2016, que sempre estiveram presentes e colaboraram para a conclusão deste trabalho. Em especial aos colegas Bruno Zunta Vizioli, Sísara da Rocha Oliveira e Daniela Jerszurki.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, que viabilizou a conclusão da presente dissertação.

RESUMO

Os recursos computacionais ligados à agricultura contribuem significativamente com o aumento de produtividade de diversas culturas ao redor do mundo. Os *softwares* que simulam a produção de culturas agrícolas possibilitam o planejamento da safra antes mesmo de implantá-la, ajustando técnicas e manejos que contribuem para o desempenho da atividade. Além disso, na área da pesquisa, os modelos reduzem a necessidade de implantação de grandes e duradouros experimentos, reduzindo custos e mão-de-obra. A literatura é rica em exemplos de modelos complexos, exigentes quanto aos conhecimentos técnicos dos usuários, bem como na quantidade de variáveis e dados necessários para realizar as simulações. Buscando minimizar parte destes problemas ou dificuldades, pesquisadores vinculados a *Food and Agriculture Organisation* (FAO) desenvolveram o AquaCrop, um modelo simplificado e robusto para realizar a simulação de cultivos agrícolas. O AquaCrop já foi validado em diversos países com climas e culturas variados, porém são poucos os estudos visando a sua validação e utilização no Brasil, principalmente nos Campos Gerais, região de referência na produção de grãos e pesquisa agrícola nacional. Neste sentido, teve-se por objetivo no presente trabalho verificar o desempenho do modelo AquaCrop na simulação das produtividades de soja e milho na região dos Campos Gerais, bem como mensurar os valores de atributos físico-hídricos dos solos estudados e verificar a intensidade com que eles atuam no desempenho do modelo nas simulações de produtividade. Para tal, foram levantados dados (clima, solo, cultura e manejo) dos cultivos de soja e milho, provenientes de 53 experimentos previamente realizados nas Estações Experimentais da Fundação ABC, entre os anos 2006 a 2014. Os dados de clima foram provenientes das estações agrometeorológicas anexas à cada campo experimental. Os dados de solo foram obtidos a partir da análise de amostras coletadas a campo. Os dados relativos à cultura e manejo foram provenientes de arquivos de protocolos dos experimentos na Fundação ABC. Os atributos físico-hídricos dos solos estudados não evidenciaram que o manejo adotado nos cultivos da região esteja prejudicando sua capacidade produtiva. O *software* AquaCrop respondeu positivamente as expectativas quanto a simulação das produtividades de soja e milho na região dos Campos Gerais, tendo desempenhos predominantemente “muito bom” e “ótimo”. Apesar disso, os resultados indicaram que são necessários ajustes e calibração nos coeficientes que penalizam a produtividade potencial, quando os fatores climáticos que afetam a produtividade são severos. O tipo de solo interferiu nos resultados das análises de estimativa da produtividade, sendo que os Latossolos apresentaram melhor desempenho e correlações mais estreitas que os demais solos estudados. Utilizar apenas a classificação textural do solo no AquaCrop, para predizer valores de atributos físico-hídrico do solo e simular a produtividade, indicou um caminho facilitador, mas baixo desempenho para estimar as produtividades das culturas da soja e milho nos Campos Gerais.

Palavras chave: Modelagem. Relações hídricas. *Software*.

ABSTRACT

The link of computational resources to agriculture have contributed to the increase of yield and production in many crops around the world. The current crop yield simulation models allow the previous crop management planning in order to reach the good performance of the agricultural activity. In addition, the use of calibrated models decrease the need for long-term experiments, which are costly and time consuming. The literature is rich in examples of complex models, which shown high demand of data and special skills to perform the simulations. The need to find a simplified and robust model, with a minimum possible error on the simulations of crops yield was crucial to develop the AquaCrop model, proposed by Food and Agriculture Organization (FAO). The AquaCrop has been validated in several countries under different climates and crops, but there are few studies relating its validation and use in Brazil, mainly at the Campos Gerais region, which is a reference in grain production and national agricultural research. Accordingly, we had to aim verify the performance of AquaCrop model in the yield simulation of soybean and corn crop in the Campos Gerais region, as well to determine the soil water-physical properties and verify its influence on the performance of the model. For that purpose, data series from 2006 to 2014 of climate, soil, crop and management parameters of soybean and corn crops were collected from 53 experiments previously conducted at two experimental stations of ABC Foundation, Paraná State. Climate data were obtained from meteorological stations attached to each experimental field. The soil data were obtained from field sampling. The data about the crops and its current management practices were derived from running test protocols. The soil water-physical properties did not show the negative impact of crops management in the region about soil quality and production capacity. The software AquaCrop met the expectations of soybean and corn yields simulation in the Campos Gerais region, showing, at least, "very good" performances. Despite, we recommend adjustments and calibration of the coefficients which penalize the potential productivity in the Campos Gerais region, severe affected by climatic factors. The soil type affected the estimation analysis, with the Latosols allowing the better performance than other soil types. The use of the soil texture to predict soil water-physical properties and simulate the crop yield in AquaCrop, was considered as a facilitating way, but was appointed by underperforming the crop yield estimates in Campos Gerais region.

Keywords: Modeling. Water relations. Software.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	10
1.1	REFERÊNCIAS	15
2	CAPÍTULO I – ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE SOLOS NO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS ..	17
2.1	RESUMO	17
2.2	ABSTRACT	18
2.3	INTRODUÇÃO	19
2.4	MATERIAL E MÉTODOS	21
2.4.1	Descrição das áreas amostradas	21
2.4.2	Coleta e análise das amostras	22
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
2.5.1	Textura	26
2.5.2	Massa específica do solo e das partículas de solo	27
2.5.3	Porosidade total, macro e microporosidade	28
2.5.4	Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível	30
2.5.5	Condutividade hidráulica saturada	30
2.5.6	Correlações entre os atributos físico-hídricos	31
2.6	CONCLUSÕES	33
2.7	REFERÊNCIAS	34
3	CAPÍTULO II – DESEMPENHO DO MODELO AQUACROP NA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS SOJA E MILHO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS	37
3.1	RESUMO	37
3.2	ABSTRACT	38
3.3	INTRODUÇÃO	39
3.4	MATERIAL E MÉTODOS	41
3.4.1	Descrição das áreas experimentais	41
3.4.2	Dados de entrada necessários nas simulações do AquaCrop	42
3.4.3	Análises estatísticas	45
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
3.5.1	Análises dos erros e associação entre Y_r vs Y_s para cultura da soja	46
3.5.2	Análises de erro e associação entre Y_r vs Y_s para cultura do milho	51
3.5.3	Desempenho do conjunto de análises	55
3.6	CONCLUSÕES	57
3.7	REFERÊNCIAS	57

4	CAPÍTULO III – ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA E MILHO CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS	60
4.1	RESUMO	60
4.2	ABSTRACT	61
4.3	INTRODUÇÃO	62
4.4	MATERIAL E MÉTODOS	63
4.4.1	Descrição das áreas experimentais	63
4.4.2	Cenários e dados de entrada necessários nas simulações do AquaCrop	64
4.4.3	Análises estatísticas	67
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.5.1	Considerações sobre os atributos físico-hídricos “medidos” e “padrão”	68
4.5.2	Desempenho das estimativas de produtividade com o AquaCrop ..	71
4.6	CONCLUSÕES	74
4.7	REFERÊNCIAS	74
5	CONCLUSÃO GERAL	76
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
	REFERÊNCIAS GERAIS	78
	APÊNDICE 1 – DETERMINAÇÃO DA TEXTURA DO SOLO COM O MÉTODO DO DENSÍMETRO (Adaptado de Embrapa, 1997)	83
	APÊNDICE 2 – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DE PARTÍCULAS DO SOLO COM O MÉTODO DO BALÃO VOLUMÉTRICO MODIFICADO (Adaptado de Gubiani et al., 2006) ...	85
	APÊNDICE 3 – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO SOLO COM O MÉTODO DO ANEL VOLUMÉTRICO (Adaptado de Embrapa, 1997)	87
	APÊNDICE 4 – DETERMINAÇÃO DA UMIDADE NA CAPACIDADE DE CAMPO COM O MÉTODO DA MESA DE TENSÃO, PARA DETERMINAÇÃO DA MICROPOROSIDADE DO SOLO (Adaptado de Embrapa, 1997)	88
	APÊNDICE 5 – DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO, COM O MÉTODO DO PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE (Adaptado de Embrapa, 1997)	90
	APÊNDICE 6 – ATRIBUTOS FÍSICOS-HÍDRICOS DOS SOLOS DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DA FUNDAÇÃO ABC	92

1 INTRODUÇÃO GERAL

Os sistemas de produção agrícola têm sido revistos constantemente. Isto se deve, principalmente, à busca por práticas que minimizem os custos de produção e causem menores prejuízos ao ambiente. Neste sentido, *softwares* desenvolvidos para auxiliar na gestão de lavouras tornaram-se ferramentas fundamentais. Dentre eles estão os sistemas de modelos computacionais que simulam a produção de culturas agrícolas (Mello & Caimi, 2008; Steduto et al., 2009).

Um modelo é a abstração de um sistema real, sendo representados por uma linguagem específica, tendo por objetivo a condução de fenômenos naturais em cenários distintos. Dentre os vários tipos de modelos existentes, os mais importantes podem ser classificados em conceituais, físicos e matemáticos (Pessoa et al., 1997).

Os modelos matemáticos fazem uso de relações funcionais, variáveis e parâmetros para representar o sistema real. Funcionam com rotinas de entrada de dados, os quais são submetidos às relações funcionais do simulador, gerando saídas na forma de relatórios, gráficos ou tabelas (Bernardon & Calgaro, 2007). A maioria dos modelos matemáticos que simulam a produção de culturas agrícolas são formulados a partir de experimentos, possuindo relações empíricas entre grandezas, as quais representam aceitavelmente a produção a campo. São importantes tanto no gerenciamento dos cultivos quanto no ramo da pesquisa (Pessoa et al., 1997; Bernardon & Calgaron, 2007).

Os modelos de simulação de produção agrícola geralmente utilizam relações hídricas para realizar estimativas, por ser o meio em que ocorre o aporte de matéria acumulada na planta. Existe uma relação direta entre o rendimento da cultura (Y) e a razão entre a transpiração da cultura (Tr_c) e evaporação potencial (E_o), que torna a simulação possível (Doorenbos & Kassam, 1979; Matzenauer et al., 1995). Diversas equações que relacionam o rendimento de grãos com variáveis meteorológicas foram desenvolvidas e testadas, buscando estabelecer relações funcionais de predição de produtividade para os modelos ou sistemas de simulação (Jensen, 1968; Thompson, 1969; Baier, 1973; Nelson e Dale, 1978; Doorenbos & Kassam, 1979; Liu et al., 1989)

A principal vantagem dos modelos matemáticos voltados à agricultura está na possibilidade de avaliação do funcionamento do sistema de produção antes de

implantá-lo, evitando possíveis erros de planejamento. Além disso, possibilita a previsão das práticas de manejo que melhor se ajustam ao cenário presente ou futuro, com custo minimizado (Sentelhas et al., 2001; Tojo-Soler et al., 2001; Mello & Caimi, 2008). Os modelos também possuem utilidades na pesquisa, auxiliando na interpretação de resultados experimentais e simulação do desenvolvimento das culturas em diversos cenários, o que evita a complexidade de instalação e condução de longos experimentos de campo, além dos custos elevados (Whisler et al., 1986).

Na busca por maior precisão e robustez, os modelos tornaram-se mais complexos. Uma das maiores dificuldades encontradas no uso de simuladores de produção agrícola está justamente na elevada complexidade dos modelos, exigindo certo grau de conhecimento em sistemas de simulação para compreensão de sua funcionalidade. Além disso, existe a incompatibilidade entre modelos, já que são bastante heterogêneos e elaborados sem nenhuma interação. Outra imperfeição comum é a deficiência em encontrar dados que descrevam com precisão a variabilidade presente em sistemas de cultivo agrícola (Sentelhas et al., 2001; Tojo-Soler et al., 2001; Mello & Caimi, 2008; Pavan et al., 2009).

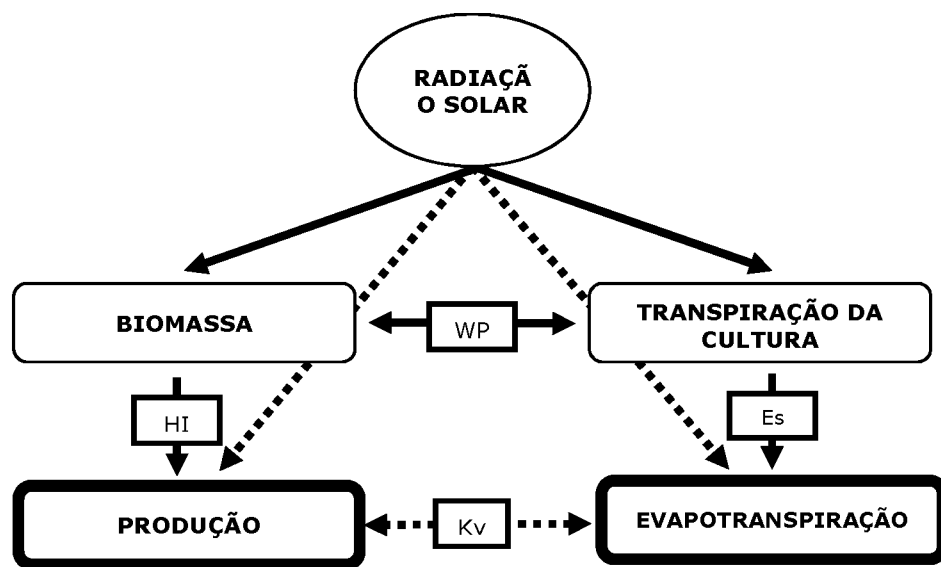
Visando minimizar parte destes problemas, pesquisadores vinculados a *Food and Agriculture Organisation* (FAO) desenvolveram o modelo AquaCrop. Raes et al. (2009) e Steduto et al. (2009) consideram o AquaCrop uma evolução, diferindo dos principais modelos de simulação de produção agrícola por sua simplicidade, precisão e robustez.

O AquaCrop evoluiu a partir da equação de Doorenbos & Kassam (1979) em dois aspectos principais (FIGURA 1.1). O primeiro trata da separação da evapotranspiração (ET) em evaporação do solo (E) e transpiração da cultura (Tr). A transpiração é a fração de água que realmente passa pelo metabolismo do vegetal e contribui para o acúmulo de matéria seca. A separação da ET aumenta a precisão, pois evita o efeito da contabilização da água não produtiva. O segundo aspecto refere-se à estimativa da produtividade (Y) a partir da produção de biomassa (B) e do índice de colheita (HI), permitindo a distinção entre fatores ambientais que influem na produção e eficiência como característica da própria cultura na conversão da biomassa. Os dois aspectos comentados levaram ao desenvolvimento da seguinte equação:

$$B = WP \cdot \sum_{i=1}^n Tr_i$$

Sendo: B – biomassa acumulada (kg); WP – parâmetro de produção pela água (kg m² mm⁻¹); Tr_i – transpiração da cultura no i -ésimo intervalo de período (mm); n – período considerado (unidade).

FIGURA 1.1 – EVOLUÇÃO DO MODELO AQUACROP



LEGENDA: traços contínuos representam as evoluções implementadas a partir dos traços descontínuos.

FONTE: Adaptado de Steduto et al. (2008)

O parâmetro WP representa a biomassa acumulada (kg) por área (m²) e lâmina de água transpirada acumulada (mm) durante o período de produção de biomassa (Raes et al., 2012).

Ao contrário de outros modelos, o AquaCrop também considera a expansão do dossel (CC) ao invés de índice de área foliar (LAI). A CC é um dado mais fácil de ser obtido, simplificando o modelo. A frequência de coleta de dados também é outra importante mudança realizada, em comparação à maioria dos modelos propostos na área. A redução na frequência de coleta dos dados propicia escala semelhante à

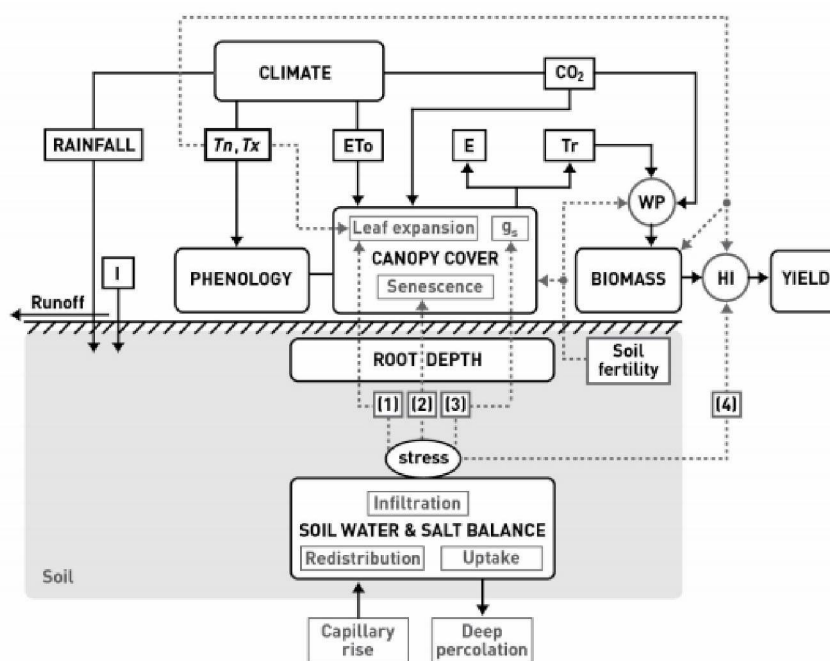
resposta da planta às variações no fornecimento de água. Assim, estimado o acúmulo de biomassa, calcula-se o rendimento da cultura com a equação:

$$Y = B \cdot HI$$

Sendo: Y – produtividade da cultura (kg ha^{-1}); B – biomassa acumulada (kg); HI – índice de colheita da cultura.

O AquaCrop também dispõe de um conjunto completo de componentes (FIGURA 1.2), auxiliando em sua funcionalidade, precisão e robustez. O conjunto de componentes estão inseridos em quatro áreas do menu inicial do *software*, sendo: clima, cultura, manejo e solo (Steduto et al., 2009).

FIGURA 1.2 – FLUXOGRAMA DO CONJUNTO DE COMPONENTES DO SOFTWARE AQUACROP



FONTE: Raes et al. (2009)

A literatura apresenta alguns exemplos de validação e simulações com o modelo AquaCrop, em que obtiveram-se resultados satisfatórios, como: Iqbal et al. (2014) na produção de trigo submetido ao déficit hídrico no Norte da China; Abedinpour et al. (2012) no cultivo de milho sob diferentes doses de fertilização no semiárido dos Estados Unidos; Mkhabela & Bullock (2012) na produção de trigo em diferentes disponibilidades de água no Oeste do Canadá; e, Geerts et al. (2009) no

cultivo de quinua sob diferentes lâminas de irrigação no Altiplano Boliviano; entre outros.

A aplicabilidade do modelo AquaCrop em diversas culturas e países evidencia sua robustez e abrangência, porém são poucos os estudos visando a sua validação e utilização no Brasil. A região dos Campos Gerais é um local de referência na pesquisa e na produção de grãos no Estado do Paraná. Na região se localiza a Fundação ABC, uma importante instituição de pesquisa, responsável por inúmeras pesquisas no âmbito agrícola, que tem contribuído significativamente com o avanço da tecnologia e aprimoramento da produção agrícola na região (Fundação ABC, 2015). Dados levantados nas Estações Experimentais da Fundação ABC já deram suporte para alguns estudos, na tentativa de identificar o desempenho de funções água-cultura ou testar modelos que estimem a produção de culturas agrícolas (Araujo et al., 2011; Scheraiber, 2012).

Assim, tendo em vista as contribuições do AquaCrop no planejamento de lavouras e na pesquisa, bem como as poucas evidências do seu uso no Brasil, tem-se que a verificação de seu desempenho na simulação da produção agrícola pode ser interessante para o cenário nacional. Neste sentido, teve-se por objetivo no presente trabalho verificar o desempenho do modelo AquaCrop na simulação das produtividades de soja e milho na região dos Campos Gerais, bem como mensurar os valores de atributos físico-hídricos dos solos estudados e verificar a intensidade com que eles atuam no desempenho do modelo nas simulações de produtividade.

Para atingir o objetivo geral estabelecido, o presente trabalho foi estruturado e encontra-se subdividido em três capítulos:

Capítulo I – Atributos físico-hídricos de solos no sistema de plantio direto, região dos Campos Gerais;

Capítulo II – Desempenho do modelo AquaCrop na simulação da produtividade das culturas soja e milho na região dos Campos Gerais;

Capítulo III – Estimativa da produtividade das culturas da soja e milho considerando a influência dos atributos físico-hídricos do solo na região dos Campos Gerais.

1.1 REFERÊNCIAS

- Abedinpour M, Sarangi A, Rajput TBS, Singh M, Pathak H, Ahmad T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in semi-arid environment. *Agricultural Water Management*. 2012; 110:55-66.
- Araújo MA, Souza JLM, Tsukahara, RY. Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum Agronomy*. 2011; 33:23-31.
- Baier W. Crop-weather analysis model: review and model development. *Journal of Applied Meteorology*. 1977; 16:937-947.
- Bernardon T, Calgaro M. Modelo de simulação do crescimento de plantas. *Ambiência*. 2007; 3:283-294.
- Doorenbos J, Kassam AH. Yield response to water. *Irrigation and Drainage*. Roma: FAO; 1979. (Paper, 33).
- Fundação ABC. Relatório anual 2015 [internet]. Castro, PR: Fundação ABC; 2015 [acesso em 13 de julho de 2015]. Disponível em: http://fundacaoabc.org/docs/relatorio_anual/2015.pdf.
- Geerts S, Raes D, Garcia M, Miranda R, Cusicanqui JA, Taboada C, Mendoza J, Huanca R, Mamani A, Condori O, Mamani J, Morales B, Osco V, Steduto P. Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. *Agronomy Journal*. 2009; 101:498-508.
- Iqbal MA, Shen Y, Stricevic R, Pei H, Sun H, Amiri E, Penas A, Rio S. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*. 2014; 135:61-72.
- Jensen ME. Water consumptions by agricultural plants. In: Kozlowsky TT, editor. *Water deficits and plant growth*. New York: USDA; 1968. p.1-22.
- Liu WT, Botner DM, Sakamoto CM. Application of Ceres mayze model to yield prediction of a Brazilian maize hybrid. *Agricultura and Forest Meteorology*. 1989; 45:229-312.
- Matzenauer R, Bergamaschi H, Berla TO, Riboldi J. Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*. 1995; 1:225-241.
- Mello A, Caimi LL. Simulação na validação de sistemas computacionais para agricultura de precisão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2008; 12:666-675.
- Mkhabela MS, Bullock PR. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*. 2012; 110:16-24.

Nelson WL, Dale RF. Effect of trend or technology variables and record period on prediction of corn yields with weather variables. *Journal of Applied Meteorology*. 1978; 177:926-933.

Pavan W, Fernandes JMC, Hölbig CA, Fraisse CW. Padrões de projeto aplicados a modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*. 2009; 1:15-29.

Pessoa MCPY, Luchiari Júnior A, Fernandes EN, Lima MA. Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA; 1997.

Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: chapter 1. Roma: FAO; 2009.

Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop 4.0 – The FAO crop model to simulate yield response to water: chapter 3. Roma: FAO; 2012.

Scheraiber CF. Adaptação metodológica para a estimativa e caracterização das relações hídricas como suporte ao planejamento agrícola [dissertação]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2012.

Sentelhas PC, Faria RT, Chaves MO, Hoogenboom G. Avaliação dos geradores de dados meteorológicos WGEN e SIMMETEO, nas condições tropicais e subtropicais brasileiras, usando modelos de simulação de culturas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 2001; 9:357-376.

Steduto P, Hsiao TC, Raes D, Fereres E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 2009; 101:426-437.

Steduto P, Raes D, Hsiao TC, Fereres E, Hen L, Izzi G, Hoogeveen J. AquaCrop: A new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes*. 2008; 80:285-292.

Thompson LM. Weather and technology in the production of corn in the U.S. *Agronomy Journal*. 1969; 61:453-456.

Tojo-sole RC, Folegatti MV, Faria RT. Uso do modelo CERES-Maize para identificação de características genéticas desejáveis e de práticas adequadas de manejo em milho “safrinha” e determinação de práticas adequadas de manejo em condições de risco climático. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 2001; 9:339-346.

Whisler FD, Acock B, Baker DN, Fye RE, Hodges HF, Lambert JR, Lemmon HE, Mckinion JM, Reddy VR. Crop simulation models in agronomic systems. *Advanced Agronomy*. 1986; 40:141-208.

2 CAPÍTULO I – ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE SOLOS NO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS

2.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho determinar e associar os atributos físico-hídricos de quatro tipos de solos sob sistema plantio direto, localizados nas Estações Experimentais da Fundação ABC, região dos Campos Gerais. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo em três profundidades: 0,0-0,10 m; 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m. As amostras foram provenientes de parcelas das Estações Experimentais da Fundação ABC, localizadas em Arapoti, Castro, Ponta Grossa, Tibagi e distrito de Socavão, Estado do Paraná e Itaberá, Estado de São Paulo. Foram obtidos valores de textura (argila, silte, areia fina e areia grossa); massa específica (solo e partículas do solo); porosidade (total, macro e micro); umidade volumétrica (ponto de murcha permanente e capacidade de campo); capacidade de água disponível e condutividade hidráulica saturada. Os resultados indicaram que a textura predominante dos solos estudados é argilosa a muito argilosa, exceto no município de Arapoti e Ponta Grossa, onde as texturas foram franco argilo-arenosa e argilo-arenosa, respectivamente. A média da massa específica do solo está compreendida entre 980 kg m^{-3} a 1400 kg m^{-3} , limites considerados ideais aos solos de textura franca, no município de Arapoti, e textura argilosa nos demais municípios. A média da massa específica das partículas de solo (2650 kg m^{-3}) indicou que os solos da região foram formados a partir de minerais com elevado teor de quartzo em sua composição. A média da porosidade total dos solos está compreendida entre $0,47 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,63 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, faixa próxima ao ideal para o desenvolvimento de culturas anuais sob sistema de plantio direto. A proporção entre micro e macroporos é predominantemente próxima a 3:1, sendo os microporos relativamente superior em alguns tipos de solos. Os valores médios da capacidade de água disponível dos solos estudados variaram entre 48 mm (Tibagi) a 62 mm (Arapoti). As médias da condutividade hidráulica saturada dos solos indicaram condição “moderada”, com menores valores ocorridos em Tibagi. Os atributos físico-hídricos dos solos estudados não evidenciaram que o manejo adotado nos cultivos da região esteja prejudicando sua capacidade produtiva.

Palavras-chave: Fundação ABC; textura; massa específica; porosidade; condutividade hidráulica saturada; curva de retenção da água no solo.

2.2 ABSTRACT

The objective of this study was to determine and link the physical and hydraulic properties of four soil types under no-tillage system, located at the Experimental Stations of the ABC Foundation, at the Campos Gerais region. Disturbed and undisturbed soil samples were collected at three depths: from 0.0 to 0.10 m; 0.10-0.25 m; and, 0.25-0.40 m. At locations of Arapoti, Castro, Ponta Grossa, Tibagi and Socavão district, State of Paraná and Itaberá, State of Sao Paulo. Analysis consisted in the determination of soil texture; density (soil and soil particles); porosity (total, macro and micro); volumetric water content (permanent wilting point and field capacity); available water capacity and saturated hydraulic conductivity. The results indicated the predominant texture of soils is clay, except in the city of Arapoti and Ponta Grossa, where the soil texture was classified as silty clay loam and sandy clay, respectively. The average specific soil mass was between 980 kg m^{-3} to 1400 kg m^{-3} , limit considered optimum to the textured soils in Arapoti, and clayey in other cities. The average soil particles density (2650 kg m^{-3}) indicated that the soils of the region were formed from mineral with a high quartz content in its composition. The average soil porosity was between $0.47 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ and $0.63 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, around to the optimal condition for annual crop development under no-tillage system. The proportion between micro and macropores was mainly close to 3:1 and the relative larger amount of micropores in some soil types. The average values of soil available water capacity ranged from 48 mm (Tibagi) to 62 mm (Arapoti). The average saturated hydraulic conductivity was indicated as "moderate", with the lowest values occurring in Tibagi. The soil water-physical properties did not show the negative impact of crops management in the region about soil quality and production capacity.

Keywords: ABC Foundation; texture; specific mass; porosity; saturated hydraulic conductivity; soil water retention curve.

2.3 INTRODUÇÃO

As consequências das práticas de manejo sobre a qualidade física do solo atuam diretamente no desenvolvimento de culturas em sistemas agrícolas. Por isso, o conhecimento dos impactos causados pelo manejo ao sistema se torna essencial. Alguns dos atributos físico-hídricos do solo, como capacidade de água disponível (*CAD*) na rizosfera, massa específica do solo (ρ_s), porosidade (α) e condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), podem ajudar a compreender como o manejo do solo tem influenciado na sua qualidade (Dexter & Youngs, 1992; Lal, 1994; Fezer, 2013).

Os sistemas de preparo do solo podem afetar diretamente seus atributos físico-hídricos. O sistema de plantio direto, caracteriza-se pela ausência de revolvimento do solo, aliado a rotação de culturas, muitas vezes combinado com o acúmulo de material vegetal da cultura anterior. A não-mobilização do solo e o acúmulo de material orgânico provocam modificações significativas nos atributos físico-hídricos do solo e podem afetar sua qualidade (Stone et al., 2006).

Muitos atributos do solo têm grande utilidade no planejamento e manejo das lavouras, e na avaliação da qualidade do solo. A massa específica do solo (ρ_s) é um dos atributos físico-hídricos mais sensível ao sistema de preparo do solo. A alteração da ρ_s afeta a porosidade do solo e, conseqüentemente, a disponibilidade de água para as plantas, capacidade produtiva e qualidade. Considera-se que a distribuição porosa ideal para a produção agrícola deva ser 2/3 para microporos e 1/3 para macroporos, sendo que a porosidade total (α) ideal deve ficar em torno de $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Hillel, 1970; Reichardt & Timm, 2004).

A porosidade de aeração (β) consiste no espaço poroso não ocupado por água. A literatura indica que a β deve ser suficiente para que a difusão de oxigênio no solo supra a demanda de oxigênio das culturas agrícolas em pleno desenvolvimento. Estudos indicam que a β deve ser de, no mínimo, $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Erickson, 1982; Reichardt & Timm, 2004).

A elaboração da curva de retenção de água do solo permite estimar ou auxiliar estudos envolvendo atributos como a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e capacidade de água disponível (*CAD*) no solo. São atributos que permitem quantificar a dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera e a disponibilidade de água para as culturas agrícolas. Podem ser

utilizados em diversas estimativas do balanço hídrico do solo, produtividade e, conseqüentemente, auxiliar nas decisões de estratégias de manejo. Sistemas de preparo do solo podem alterar a distribuição de poros por tamanho, alterando também a curva de retenção da água no solo e seus atributos (Grable & Siemer, 1968; Cassel & Nielsen, 1986; Reichardt & Timm, 2004; Costa et al., 2008).

A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) também é um atributo físico-hídrico considerado muito variável e sensível ao manejo do solo. A K_{sat} está relacionada com a movimentação da água ao longo do perfil de solo. Valores de K_{sat} podem dobrar em áreas com revolvimento intensivo do solo, quando comparada aos sistemas sem revolvimento, principalmente nas camadas superiores. Há indícios também, de que a adição de matéria orgânica ao solo favorece a infiltração e pode aumentar significativamente os valores de K_{sat} (Reichardt & Timm, 2004).

A literatura considera que as relações entre atributos físico-hídricos do solo e produtividade de culturas agrícolas estão em fase de investigação, e ainda podem ser aprofundadas. Um dos principais motivos que dificulta a realização dos estudos está ligado à complexidade para quantificar alguns atributos. Além disso, existe o problema da variabilidade espacial e temporal, que dificulta descrever ou estimar as medidas, que também podem variar conjuntamente (Dexter, 1988; Tormena et al., 1998).

A região dos Campos Gerais é um local de referência na pesquisa e na produção de grãos no Estado do Paraná. Na região se localiza a Fundação ABC, uma importante instituição de pesquisa privada, responsável por inúmeras pesquisas no âmbito agrícola, que tem contribuído significativamente com avanço da tecnologia e aprimoramento da produção na região (Fundação ABC, 2015). Porém, a obtenção de dados, principalmente referente aos distintos tipos de solos da região é bastante restrita e limitada.

Tendo em vista a importância dos atributos físico-hídricos do solo e a dificuldade em obtê-los em bancos de dados, ou mesmo mensurá-los, teve-se por objetivo no presente estudo determinar e associar os atributos físico-hídricos de quatro tipos de solos sob sistema plantio direto, localizados nas Estações Experimentais da Fundação ABC, região dos Campos Gerais.

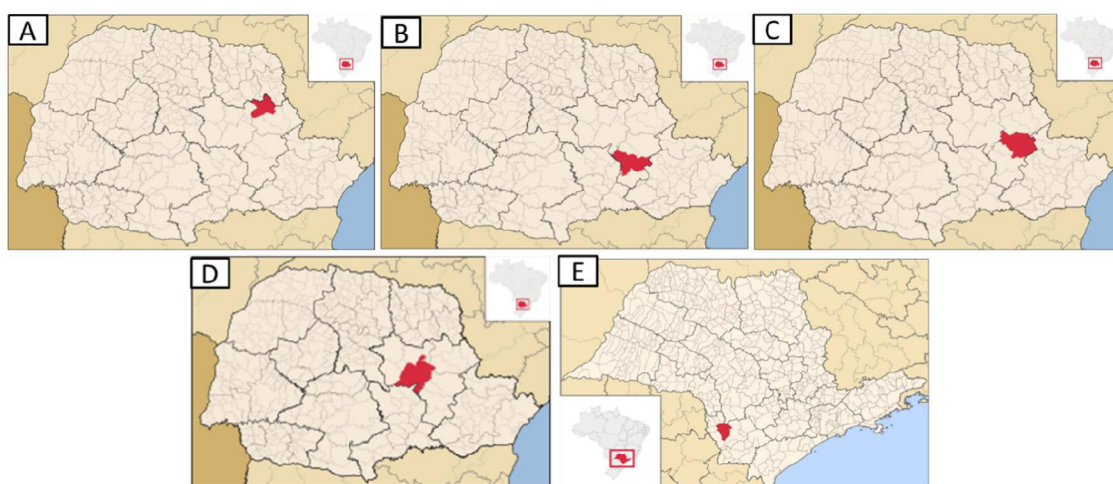
2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 Descrição das áreas amostradas

Os campos experimentais da Fundação ABC estão localizados em Arapoti, Castro, Ponta Grossa, Tibagi e no distrito de Socavão, Estado do Paraná e, Itaberá, no sul do Estado de São Paulo (FIGURA 2.1). Foram coletadas amostras de solos nas parcelas experimentais pertencentes ao setor de Agrometeorologia da Fundação ABC. Cada parcela possui dimensão de 50 m x 100 m, tendo o relevo plano a suave ondulado. O preparo do solo é sem revolvimento, no sistema plantio direto com restos vegetais da safra anterior. O sistema de rotação de culturas adotado cultiva soja e milho no verão e trigo e aveia preta no inverno.

A classificação dos solos das parcelas experimentais amostradas foi obtida nos mapas de solos, com escala 1:10.000, provenientes de levantamento realizado pela própria Fundação ABC (TABELA 2.1). Os tipos climáticos foram identificados em Alvarez et al. (2013), que utilizou a classificação climática de Köppen para essa finalidade. A localização, coordenadas geográficas e altitude foram mensurados com aparelho de GPS.

FIGURA 2.1 – MUNICÍPIOS DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS



LEGENDA: (A) Arapoti-PR; (B) Ponta Grossa-PR; (C) Castro-PR; (D) Tibagi-PR; (E) Itaberá-SP

FONTE: Guia Geográfico

TABELA 2.1 – CARACTERIZAÇÃO QUANTO À LOCALIZAÇÃO, SOLO, CLIMA, COORDENADAS GEOGRÁFICAS E ALTITUDES DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC.

Município	Estado	Solo	Clima	Latitude ----- (graus) -----	Longitude -----	Altitude (m)
Arapoti	Paraná	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	Cfa/Cfb (1)	24,18° S	49,85° W	902
Castro	Paraná	CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Cfb	24,85° S	49,93° W	1001
Itaberá	São Paulo	PLANOSSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Cfa	24,07° S	49,15° W	735
Ponta Grossa	Paraná	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	Cfb	25,01° S	50,15° W	1000
Socavão	Paraná	ORGANOSSOLO MÉSICO Sáprico típico	Cfb	24,68° S	49,75° W	1026

(1) Local de transição climática. FONTE: A autora (2016)

2.4.2 Coleta e análise das amostras

Foram coletadas três amostras deformadas e três indeformadas de solo, em cinco pontos representativos em cada parcela experimental, nas camadas de 0,0-0,10 m; 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m de profundidade. Logo, totalizaram-se 15 amostras deformadas e 15 indeformadas por Estação Experimental, ou 90 amostras deformadas e 90 indeformadas de solo nas seis Estações Experimentais.

As amostras deformadas foram coletadas com trado calador e armazenadas em sacos plásticos. As amostras indeformadas foram coletadas com o auxílio de anéis volumétricos de 5 cm de diâmetro e 3 cm de altura. Após a coleta foram envoltas com papel alumínio. Todas as amostras foram devidamente identificadas e levadas para os Laboratórios da Universidade Federal do Paraná, para serem analisadas. Os atributos físico-hídricos dos solos analisados foram: teores de argila (g kg^{-1}), silte (g kg^{-1}), areia fina (g kg^{-1}) e areia grossa (g kg^{-1}); massa específica do solo (ρ_s , kg m^{-3}) e partículas do solo (ρ_{ps} , kg m^{-3}); porosidade total (α , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); macro e microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{pmp} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); capacidade de água disponível (CAD , mm) e condutividade hidráulica saturada (K_{sat} , mm dia^{-1}). A seguir serão apresentados alguns detalhes das análises realizadas:

a) Análises com amostras deformadas de solo:

Os teores de argila (g kg^{-1}), silte (g kg^{-1}), areia fina (g kg^{-1}) e areia grossa (g kg^{-1}) do solo foram determinados com o método do densímetro, conforme Embrapa (1997), no Laboratório de Física do Solo da UFPR (APÊNDICE 1).

A massa específica das partículas do solo (kg m^{-3}) foi determinada com o método do balão volumétrico modificado, conforme Gubiani et al. (2006), no Laboratório de Física do Solo da UFPR (APÊNDICE 2).

b) Análises com amostras indeformadas de solo:

A massa específica do solo (kg m^{-3}) foi determinada com o método do anel volumétrico, conforme Embrapa (1997), no Laboratório de Física do Solo da UFPR (APÊNDICE 3).

A umidade na capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), macro e microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) foram determinadas conforme Embrapa (1997), no Laboratório de Manejo de Bacias Hidrográficas da UFPR. A porosidade total foi considerada igual à umidade volumétrica do solo na saturação (θ_{sat}). A umidade na capacidade de campo foi determinada com anéis volumétricos dispostos em mesa de tensão à 0,01 MPa (APÊNDICE 4). Os valores de microporosidade do solo foram considerados iguais aos valores de θ_{CC} . Os valores de macroporos das amostras foram obtidos fazendo a diferença entre a θ_{sat} e a θ_{CC} (Fabian & Ottoni Filho, 2000).

Os parâmetros θ_r , θ_{sat} , α , m e n da equação de Van Genuchten (1980) foram estimados com o programa de pedotransferência SPLINTEX, versão 1.0 (Prevedello, 1999). Para cada camada dos pontos amostrais das localidades estudadas foram necessários os seguintes dados de entrada para o programa: teor acumulado de argila (%), silte (%), areia fina (%) e areia grossa (%), massa específica das partículas de solo (kg m^{-3}), massa específica do solo (kg m^{-3}), umidade volumétrica do solo saturado (%) quando submetido à tensão de 0,01 MPa. Com os parâmetros obtidos, considerou-se como ponto de murcha permanentes (θ_{PMP}) a umidade obtida na tensão de 1,5 MPa, estimada com a equação de Van Genuchten (1980).

A capacidade de água disponível no solo (CAD) foi determinada a partir da expressão:

$$CAD = \sum_{i=1}^n (\theta_{CCi} - \theta_{PMPI}) \cdot z_i$$

Sendo: CAD – capacidade de água disponível no solo (mm); θ_{CCi} – umidade volumétrica do solo na capacidade de campo da i -ésima camada ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_{PMPI} – umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente da i -ésima camada ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); z_i – profundidade da i -ésima camada enraizada do solo (mm); n – número de camadas consideradas.

A condutividade hidráulica saturada (mm dia^{-1}) foi determinada conforme Embrapa (1997), em permeâmetro de carga constante, com o auxílio de frasco de Mariotti, no Núcleo de Atividades de Engenharia em Biosistemas (NAEB) da UFPR (APÊNDICE 5).

Após a coleta e análise das amostras em laboratório, os dados gerados foram tabulados e analisados em planilha eletrônica. As comparações e discussões foram realizadas baseando-se em medidas de tendência e dispersão, bem como comparação com dados considerados padrões pela literatura.

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises das amostras deformadas e indeformadas de solo em laboratório, das seis Estações Experimentais da Fundação ABC, encontram-se dispostos no APÊNDICE 6 E TABELA 2.2. Acredita-se que a disponibilidade dos dados terá grande utilidade para inúmeros trabalhos que serão desenvolvidos na área. Muitos desses trabalhos não têm o objetivo de coletar e analisar os atributos físico-hídricos do solo, mas muitas vezes necessitam de algum valor de atributo físico-hídrico como referência em seus estudos.

Verificou-se homogeneidade para a maioria dos atributos físico-hídricos, nas diferentes camadas de solo (APÊNDICE 6). A camada de 0-10 centímetros foi a que apresentou maior variabilidade em relação às demais, principalmente para valores dos teores de materiais que compõe a textura do solo e K_{sat} .

TABELA 2.2 – VALORES MÉDIOS DOS TEORES DE AREIA, SILTE, AREIA FINA, AREIA GROSSA E AREIA TOTAL, MASSA ESPECÍFICA DO SOLO (ρ_s), MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DE SOLO (ρ_{ps}), POROSIDADE TOTAL (α), MICROPOROSIDADE, MACROPOROSIDADE, UMIDADE VOLUMÉTRICA NO PONTO DE MURCHA PERMANENTE (θ_{PMP}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA CAPACIDADE DE CAMPO (θ_{CC}), CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL (CAD) E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (K_{sat}), EM TRÊS CAMADAS DE SOLOS DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC.

Local	Camada (m)	----- Textura (g kg ⁻¹) -----					ρ_s (kg m ⁻³)	ρ_{ps} (kg m ⁻³)	α (m ³ m ⁻³)	Microporos (m ³ m ⁻³)	Macroporos (m ³ m ⁻³)	θ_{PMP} (m ³ m ⁻³)	θ_{CC} (m ³ m ⁻³)	CAD (mm)	K_{sat} (mm dia ⁻¹)
		Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total									
Arapoti	0,0-0,10	290,00	75,00	200,17	434,83	635,00	1403,50	2571,20	0,49	0,35	0,15	0,15	0,34		1394,86
Arapoti	0,10-0,25	305,00	70,00	197,56	427,44	625,00	1393,94	2597,49	0,47	0,31	0,16	0,15	0,30	62,49	1268,41
Arapoti	0,25-0,40	325,00	62,50	194,42	418,08	612,50	1277,39	2607,25	0,49	0,30	0,18	0,16	0,30		1124,48
Castro	0,0-0,10	532,50	135,00	80,12	252,38	332,50	1058,91	2490,18	0,63	0,51	0,12	0,36	0,50		418,32
Castro	0,10-0,25	585,00	122,50	64,41	228,09	292,50	1046,86	2531,43	0,60	0,47	0,13	0,33	0,47	54,15	368,23
Castro	0,25-0,40	642,50	100,00	56,82	200,68	257,50	976,93	2578,58	0,62	0,45	0,17	0,32	0,45		325,74
Itaberá	0,0-0,10	517,50	92,50	167,45	222,55	390,00	1226,58	2631,83	0,55	0,40	0,15	0,28	0,40		516,46
Itaberá	0,10-0,25	557,50	82,50	167,51	192,49	360,00	1215,76	2631,44	0,54	0,38	0,16	0,24	0,37	54,79	462,25
Itaberá	0,25-0,40	570,00	97,50	159,73	172,77	332,50	1173,44	2616,53	0,54	0,37	0,17	0,22	0,37		420,37
Ponta Grossa	0,0-0,10	375,00	117,50	228,26	279,24	507,50	1316,62	2545,34	0,51	0,40	0,11	0,20	0,39		743,27
Ponta Grossa	0,10-0,25	392,50	105,00	229,95	272,55	502,50	1270,11	2564,71	0,50	0,35	0,15	0,20	0,35	57,94	732,57
Ponta Grossa	0,25-0,40	447,50	92,50	205,05	254,95	460,00	1059,32	2583,08	0,54	0,37	0,17	0,25	0,36		636,30
Socavão	0,0-0,10	565,00	170,00	75,98	189,02	265,00	1121,37	2330,82	0,57	0,43	0,14	0,28	0,43		335,96
Socavão	0,10-0,25	617,50	102,50	82,17	197,83	280,00	1037,67	2383,74	0,59	0,42	0,18	0,27	0,41	60,35	351,07
Socavão	0,25-0,40	627,50	90,00	84,02	198,48	282,50	1022,32	2352,74	0,59	0,41	0,18	0,24	0,40		355,54
Tibagi	0,0-0,10	610,00	215,00	102,52	72,48	175,00	996,87	2572,07	0,61	0,41	0,20	0,31	0,41		247,88
Tibagi	0,10-0,25	657,50	185,00	91,89	65,61	157,50	1020,02	2599,82	0,59	0,41	0,18	0,27	0,40	48,45	234,02
Tibagi	0,25-0,40	665,00	185,00	88,54	61,46	150,00	989,39	2627,68	0,60	0,42	0,18	0,30	0,42		228,25
Média ⁽¹⁾		515,97	116,92	137,58	230,06	367,80	1144,80	2545,27	0,56	0,40	0,16	0,25	0,39	56,36	564,59
Desvio Padrão ⁽¹⁾		129,64	50,29	63,37	113,94	156,85	162,11	108,27	0,06	0,06	0,04	0,08	0,06	10,15	378,14
CV (%) ⁽¹⁾		25,12	43,01	46,06	49,53	42,65	14,16	4,25	10,77	15,51	24,63	32,40	15,69	18,02	66,98

⁽¹⁾ Medidas de tendência e dispersão calculados com valores de todas as amostras retiradas nas seis Estações Experimentais (90 amostras).

FONTE: A autora (2016)

Os coeficientes de variação obtidos evidenciaram que a ρ_{ps} foi o atributo que apresentou menor variação, dentre os solos estudados. O valor obtido está dentro do esperado, pois a ρ_{ps} independe da porosidade, não sendo influenciada pelo manejo. É um atributo que varia pouco de solo para solo e depende de sua constituição mineralógica. Geralmente, seu valor se aproxima do valor da massa específica do material de origem (Libardi, 2005; Reinert & Reichert, 2006). Por outro lado, a K_{sat} foi o atributo que se mostrou mais variável. A literatura afirma que a K_{sat} é naturalmente muito variável (espacial e temporalmente), e dificilmente encontram-se maneiras de estimá-la com precisão. Scherpinski et al. (2010) afirmam que a K_{sat} é um atributo que não apresenta estrutura de correlação espacial em grade de 50 x 50 metros (APÊNDICE 6 e TABELA 2.2).

A textura do solo se mostrou bastante variável na região. Porém, a classe textural não apresentou grande variação. Os atributos θ_{CC} e θ_{PMP} também apresentaram coeficientes de variação altos, embora as áreas estudadas estejam submetidas ao mesmo manejo a muitos anos, e apresentarem similaridade nas condições de porosidade (CV = 10,8%).

2.5.1 Textura

A classificação textural dos solos estudados variaram de franco argilo-arenoso a muito argiloso (TABELA 2.3). Embora os valores da textura do solo mostrem-se bastante variáveis na região, aparentemente a classe textural foi pouco variável entre camadas e municípios. Dentre os municípios, o solo com maiores teores de areia e argila estão localizados em Arapoti (700,0 g kg⁻¹) e Tibagi (687,5 g kg⁻¹), respectivamente. Os teores de silte nestes solos não se mostrou muito expressivo, variando de 25,0 g kg⁻¹ a 287,5 g kg⁻¹.

TABELA 2.3 – CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL EM TRÊS CAMADAS DOS SOLOS DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

Local	Camada (m)	Classe textural
Arapoti	0,0-0,10	Franco Argilo-arenoso
Arapoti	0,10-0,25	Franco Argilo-arenoso
Arapoti	0,25-0,40	Franco Argilo-arenoso
Castro	0,0-0,10	Argiloso
Castro	0,10-0,25	Argiloso
Castro	0,25-0,40	Muito argiloso
Itaberá	0,0-0,10	Argiloso
Itaberá	0,10-0,25	Argiloso
Itaberá	0,25-0,40	Argiloso
Ponta Grossa	0,0-0,10	Argilo-arenoso
Ponta Grossa	0,10-0,25	Argilo-arenoso
Ponta Grossa	0,25-0,40	Argilo-arenoso
Socavão	0,0-0,10	Argiloso
Socavão	0,10-0,25	Muito argiloso
Socavão	0,25-0,40	Muito argiloso
Tibagi	0,0-0,10	Muito argiloso
Tibagi	0,10-0,25	Muito argiloso
Tibagi	0,25-0,40	Muito argiloso

FONTE: A autora (2016)

2.5.2 Massa específica do solo e das partículas de solo

A massa específica do solo (ρ_s) variou entre 870 kg m⁻³ (Castro) e 1660 kg m⁻³ (Arapoti). Segundo Reichardt & Timm (2004), solos argilosos geralmente apresentam ρ_s inferior aos arenosos, fato observado no presente estudo, em que a ρ_s dos solos de Arapoti e Ponta Grossa foram superiores às demais localidades (TABELA 2.2 e APÊNDICE 6). Marcolin (2006) considera que a ρ_s de solos de textura fina, em plantio direto e sem indícios de compactação, devem variar entre 900 a 1600 kg m⁻³. Logo, os valores médios de ρ_s obtidos no presente estudo indicam que a qualidade dos solos estudados não estão sendo prejudicadas com o manejo.

A massa específica das partículas do solo (ρ_{ps}) é um atributo que não depende do manejo, mas sim da constituição do material de origem. Os valores da ρ_{ps} encontrados nos solos estudados foram similares ao indicado na literatura, para os tipos de solo (TABELA 2.2 e APÊNDICE 6). Os valores variaram de 2210 kg m⁻³ (Socavão) e 2710 kg m⁻³ (Itaberá). Os menores valores de ρ_{ps} foram encontrados nos Organossolos do distrito de Socavão (2215 kg m⁻³), devido à quantidade de matéria orgânica no solo da região. Reichardt & Timm (2004) cometam que a ρ_{ps} dos

solos que possuem teores significativos de quartzo em sua composição é muito próxima de 2650 kg m^{-3} , valor próximo a massa específica do próprio mineral. Libardi (2005) acrescenta que a ρ_{ps} é pouco variável entre os tipos de solo, podendo ficar entre 2300 kg m^{-3} a 2900 kg m^{-3} , confirmando os resultados obtidos no presente estudo.

2.5.3 Porosidade total, macro e microporosidade

A porosidade total (α) encontrada nos solos estudados variaram entre $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Arapoti) e $0,72 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Tibagi), sendo solos mais arenosos e argilosos, respectivamente (TABELA 2.2 e APÊNDICE 6). Libardi (2005) considera que os solos argilosos normalmente possuem α entre $0,52 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,61 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Os solos do município de Arapoti apresentaram valores médios inferior a $0,52 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, provavelmente por se tratar do solo com teor de areia mais acentuado dentre os estudados. Reichardt & Timm (2004) afirmam que os solos de textura franca devam possuir α entre $0,47 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

A literatura considera ideal a proporção volumétrica de um terço de macroporos para dois terços de microporos (Hillel, 1970; Reichardt & Timm, 2004). Logo, os valores médios encontrados nos solos estudados indicam condições adequadas para realização de cultivos agrícolas (TABELA 2.4). Na maioria dos casos, a proporção de macroporos é inferior à considerada ideal, o que pode estar associado a dois fatores atuando em conjunto: (i) Alto teor de argila dos solos estudados, exceto no município de Arapoti, em que a proporção de macroporos é mais próxima da ideal. O maior conteúdo de argila do solo provoca a formação de grande volume de microporos e, assim, a proporção dos macroporos é diminuída (Hillel, 1970); e, (ii) A compactação que ocorre comumente nas camadas superiores dos solos submetidos ao plantio direto (Scanlon et al, 2002). A compactação pode acarretar na diminuição do volume de macroporos nas camadas, o que explica os valores das proporções de macroporos bastante atenuadas na camada mais superficial dos solos estudados no presente trabalho, exceto no município de Tibagi.

TABELA 2.4 – VALORES MÉDIOS DE POROSIDADE TOTAL (α) E VOLUME TOTAL E RELATIVO DE MACRO E MICROPOROS DOS SOLOS, DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC.

Local	Camada (cm)	α (m ³ m ⁻³)	Volume de microporos (m ³ m ⁻³)		Volume de macroporos (m ³ m ⁻³)	
			Total	Relativo	Total	Relativo
Arapoti	0,0-0,10	0,49	0,35	0,70	0,15	0,30
Arapoti	0,10-0,25	0,47	0,31	0,65	0,16	0,35
Arapoti	0,25-0,40	0,49	0,30	0,62	0,18	0,38
Castro	0,0-0,10	0,63	0,51	0,81	0,12	0,19
Castro	0,10-0,25	0,60	0,47	0,78	0,13	0,22
Castro	0,25-0,40	0,62	0,45	0,73	0,17	0,27
Itaberá	0,0-0,10	0,55	0,40	0,73	0,15	0,27
Itaberá	0,10-0,25	0,54	0,38	0,70	0,16	0,30
Itaberá	0,25-0,40	0,54	0,37	0,69	0,17	0,31
Ponta Grossa	0,0-0,10	0,51	0,40	0,78	0,11	0,22
Ponta Grossa	0,10-0,25	0,50	0,35	0,70	0,15	0,30
Ponta Grossa	0,25-0,40	0,54	0,37	0,68	0,17	0,32
Socavão	0,0-0,10	0,57	0,43	0,76	0,14	0,24
Socavão	0,10-0,25	0,59	0,42	0,70	0,18	0,30
Socavão	0,25-0,40	0,59	0,41	0,69	0,18	0,31
Tibagi	0,0-0,10	0,61	0,41	0,68	0,20	0,32
Tibagi	0,10-0,25	0,59	0,41	0,70	0,18	0,30
Tibagi	0,25-0,40	0,60	0,42	0,71	0,18	0,29

FONTE: A autora (2016)

Em valores absolutos a quantidade média de macroporos dos solos indicaram porosidade de aeração até superior à considerada ideal (0,1 m³ m⁻³) (Erickson, 1982; Reichardt & Timm, 2004). Baver et al. (1972) e Kiehl (1979) consideram que o volume ideal de macroporos no solo deve estar entre 0,10 m³ m⁻³ e 0,16 m³ m⁻³, indicando que provavelmente a condição porosa dos solos estudados não tem prejudicado sua qualidade (TABELA 2.4 e APÊNDICE 6).

A proporção do volume de microporos foi predominantemente superior ao que é considerado ideal na literatura. A causa provável deveu-se ao teor acentuado teor de argila encontrados nesses solos. As argilas se agregam estruturalmente tendendo a formar poros pequenos (Libardi, 2005). Segundo Bognola et al. (2010), solos com maior volume de microporos tendem a possuir mais poros saturados, o que favorece o fluxo de massa e nutrientes para o suprimento das plantas.

2.5.4 Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível

Os valores absolutos de umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) observados nos solos estudados estão entre $0,24 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (TABELA 2.2). Os valores médios da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) ficaram entre $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Logo, em média, a capacidade de água disponível (CAD) dos solos estudados variou entre 48 mm (Tibagi) a 62 mm (Arapoti).

Os valores mais baixos de CAD (48,5 mm, em média) ocorreram no município de Tibagi, em decorrência dos altos valores da umidade no ponto de murcha permanente (TABELA 2.2 e APÊNDICE 6). Verificou-se a necessidade de alta tensão para movimentar a água retida nos microporos, o que geralmente está relacionado com o alto volume de microporos e, principalmente, com o diâmetro pequeno dos microporos (Libardi, 2005; Reinert & Reichert, 2006). Os baixos valores de K_{sat} ($236,7 \text{ mm dia}^{-1}$, em média) observada para os mesmos solos também podem ser explicados pelo mesmo motivo.

A amplitude entre as umidades volumétricas na capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), bem como valores altos da massa específica do solo (ρ_s), favoreceram a ocorrência dos altos valores de CAD nos solos estudados, principalmente em Arapoti. Os resultados obtidos para os solos estudados são interessantes quanto à água disponível para cultivos, ao longo do ano (TABELA 2.2 e APÊNDICE 6). Scheraiber (2012) considerando $CAD = 60 \text{ mm}$ em Ponta Grossa, obteve probabilidade de deficiência (mm decêndio^{-1}) próximo de zero, quando simulou balanços hídricos ao longo do ano para culturas com coeficiente de cultivo (kc) entre 0,75 a 1,1 e fração de água disponível (p) entre 0,3 e 0,7.

2.5.5 Condutividade hidráulica saturada

Os valores da condutividade hidráulica saturada observada nos solos estudados estão entre $218,96 \text{ mm dia}^{-1}$ (Tibagi) e $2143,59 \text{ mm dia}^{-1}$ (Arapoti). No município de Arapoti o valor encontrado foi cerca de duas a três vezes superiores aos outros municípios, para todas as camadas de solo analisadas (TABELA 2.2 e APÊNDICE 6). Os resultados devem-se à textura do solo de Arapoti, com teores

maiores de areia e alta proporção relativa de macroporos. Mesmo apresentado volume relativamente grande de macroporos, o que se observou no solo de Tibagi foi o oposto, apresentando os menores valores de condutividade hidráulica saturada e teor de areia. Logo, para os solos da região, acredita-se que a condutividade hidráulica saturada tenha maior relação com a formação textural do solo, comparada à porosidade (TABELA 2.5).

Bouma (1982) menciona que, em uma seção de solo, poros maiores podem não contribuir para o fluxo hídrico quando apresentam descontinuidade e, por isso, a macroporosidade, muitas vezes, pode não correlacionar com o fluxo de água do perfil de solo. Apesar disso, segundo a classificação de Soil Survey (1993), os menores valores médios de condutividade hidráulica saturada encontrados nas amostras analisadas pertenceram à classe “moderadamente baixa” e os maiores valores à classe “alta”. Além disso, a maior parte das amostras se enquadram nas classes “moderadas”. Na classificação de Lapsch et al. (1991), quando considerado o grau de permeabilidade, todos os valores de K_{sat} encontrados nos solos estudados pertencem ao grupo “moderada”. Os valores discrepantes do que é considerado extremamente alto ou baixo indicaram que o manejo do solo adotado não está afetado negativamente a K_{sat} e o fluxo hídrico dos solos estudados.

2.5.6 Correlações entre os atributos físico-hídricos

A maior correlação observada no presente estudo ocorreu entre a θ_{CC} e o volume de microporos do solo (TABELA 2.5), concordando com resultados obtidos por Andrade & Stone (2010), que também encontraram alta correlação entre os dois atributos em estudo com mais de duas mil amostras de solo. Fabian & Ottoni filho (2000) aproveitando a relação, validaram uma equação para estimar a θ_{CC} *in situ* a partir do volume de microporos de um Podzólico vermelho-amarelo.

Correlação estreita também foi verificada entre θ_{PMP} e α . O resultado indica que a maior parte da porosidade total dos solos estudados é constituída de microporos, estando diretamente relacionados com a retenção de água no solo e, consequentemente, fluxo hídrico (Reichardt & Timm 2004). Observou-se também estreita correlação entre a proporção de microporos e a θ_{PMP} . Carter (1988) verificou sob altas tensões que a retenção de água no solo é controlada pelo seu volume de

microporos. Sob tensões menores, a água dos macroporos se move mais rapidamente e, sob as altas tensões, os macroporos ficaram cheios de ar, enquanto a água presente nos microporos ainda está retida.

TABELA 2.5 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES ABSOLUTOS DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DOS SOLOS DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

Especifi- cação	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total	$\rho_s^{(1)}$	$\rho_{ps}^{(2)}$	$\alpha^{(3)}$	Micro- poros	Macro- poros	$\theta_{PMP}^{(4)}$	$\theta_{CC}^{(5)}$	$K_{sat}^{(6)}$
Argila	1,00*	0,40	-0,79*	-0,88*	-0,96*	-0,75	-0,14	0,69	0,60	0,11	0,63	0,60	-0,90*
Silte		1,00*	-0,42	-0,66	-0,65	-0,45	-0,13	0,46	0,39	0,08	0,30	0,39	-0,52
Areia fina			1,00*	0,53	0,79*	0,65	0,35	-0,71	-0,65	-0,05	-0,61	-0,66	0,65
Areia grossa				1,00*	0,94*	0,69	0,02	-0,59	-0,50	-0,13	-0,51	-0,49	0,89*
Areia total					1,00*	0,77*	0,16	-0,72	-0,62	-0,11	-0,62	-0,62	0,91*
ρ_s						1,00*	0,17	-0,72	-0,45	-0,40	-0,46	-0,44	0,75
ρ_{ps}							1,00*	-0,21	-0,23	0,05	-0,10	-0,24	0,18
A								1,00*	0,79	0,28	1,00	0,78*	-0,65
Microporos									1,00*	-0,36	0,78*	1,00*	-0,62
Macroporos										1,00*	-0,35	-0,37	-0,02
θ_{PMP}											1,00*	0,80*	-0,62
θ_{CC}												1,00*	-0,62
K_{sat}													1,00*

*Correlação significativa ($p > 0,05$); $^{(1)}\rho_s$ – Massa específica do solo; $^{(2)}\rho_{ps}$ – Massa específica das partículas do solo; $^{(3)}\alpha$ – Porosidade total; $^{(4)}\theta_{PMP}$ – Umidade volumétrica no ponto de murcha permanente; $^{(5)}\theta_{CC}$ – Umidade volumétrica na capacidade de campo; $^{(6)}K_{sat}$ – Condutividade hidráulica saturada. FONTE: A autora (2016)

Os microporos são capilares que atuam diretamente na retenção de água no solo. Quanto maior a proporção de microporos do solo, maior a dificuldade da água se movimentar. Por isso, solos com predomínio de microporos, quando submetidos à menor tensão, proporciona pouco movimento de água e o valor de θ_{CC} e θ_{PMP} tendem a serem altos. Logo, estes atributos tendem a apresentar estreita correlação positiva (Hillel, 1970; Cavenage et al., 1999).

Observou-se que a K_{sat} dos solos estudados possuem correlação estreita com sua textura. Geralmente, a K_{sat} correlaciona-se bem com o volume de macroporos do solo, pois é o meio em que a água se movimenta mais facilmente ao longo do perfil (Mesquita & Moraes, 2004). Porém, como os solos estudados apresentaram reduzido volume relativo de macroporos, a K_{sat} apresentou estreita correlação positiva com o teor de areia e negativa com o teor de argila. Provavelmente, a associação está ligada ao fato de solos mais arenosos tenderem a formar grande volume de macroporos e, assim, K_{sat} mais elevada. O que explica

também a estreita correlação negativa entre teor de argila e K_{sat} (Reinert & Reichert, 2006). Outra consideração refere-se a baixa correlação entre a macroporosidade e a K_{sat} devido a possível descontinuidade porosa que pode prejudicar o fluxo hídrico (Bouma, 1982).

A θ_{CC} e θ_{PMP} apresentaram estreita correlação positiva, o que naturalmente é esperado, pois são atributos que dependem das mesmas fontes de variação (Libardi, 2005). Os teores de areia e argila também apresentaram estreita correlação, só que negativa, pois são fração da totalidade da textura do solo, ou seja, quando o valor de um cresce o outro tende a diminuir. A correlação negativa indicou que o teor de silte pouco influenciou na composição textural dos solos estudados. A estreita correlação entre areia e areia grossa indicou que a fração areia é composta majoritariamente por areia grossa.

2.6 CONCLUSÕES

Os atributos físico-hídricos dos solos estudados não evidenciaram que o manejo adotado nos cultivos da região esteja prejudicando sua qualidade e capacidade produtiva:

- A textura predominante dos solos estudados é argilosa a muito argilosa. Exceto no município de Arapoti e Ponta Grossa, onde as texturas são franco argilo-arenosa e argilo-arenosa, respectivamente.
- A média da massa específica do solo está compreendida entre 980 kg m^{-3} a 1400 kg m^{-3} , limites considerados ideais aos solos de textura franca, no município de Arapoti, e textura argilosa nos demais municípios.
- A média da massa específica das partículas de solo (2650 kg m^{-3}) indica que os solos da região são formados a partir de minerais com elevado teor de quartzo em sua composição.
- A média da porosidade total dos solos está compreendida entre $0,47 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,63 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, faixa próxima ao ideal para o desenvolvimento de culturas anuais sob sistema de plantio direto. A proporção entre micro e macroporos é predominantemente próxima a 3:1, sendo os microporos relativamente superior em alguns tipos de solos.

- As médias da condutividade hidráulica saturada dos solos indicam condição “moderada”, com menores valores ocorridos em Tibagi.
- Os valores médios da capacidade de água disponível dos solos estudados variou entre 105,6 mm (Tibagi) a 193 mm (Ponta Grossa), indicando baixa probabilidade de ocorrência de déficit hídrico para as culturas cultivadas na região (soja, milho, trigo e aveia).

2.7 REFERÊNCIAS

- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G. Köppens's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. 2013; 22:711-728.
- Andrade RS, Stone LF. Estimativa da umidade em capacidade de campo em solos sob Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2010; 15:111-116.
- Baver LD, Gardner WH, Gardner WR. Soil structure: classification and genesis. In: Baver LD, Gardner WH, Gardner WR. *Soil physics*. New York: 1972; p. 130-177.
- Bognola IA, Dedeczek RA, Lavoranti OJ, Higa AR. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. *Pesquisa Florestal Brasileira*. 2010; 30:37-49.
- Bouma, J. Measuring the conductivity of soil horizons with continuous macropores. *Soil Science Society of America Journal*. 1982; 46:438-441.
- Carter MR. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. *Soil and Tillage Research*. 1988; 12:37-51.
- Cassel DK, Nielsen DR. Field capacity and available water capacity. In: *Methods of soil analysis*, Madison: ASA – SSSA; 1986.p.901-926.
- Cavenage A, Moraes MLT, Alves MC, Carvalho MAC, Freitas MLM, Buzetti S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo vermelho-escuro sob diferentes culturas. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*. 1999; 23:997-1003.
- Costa WA, Oliveira CAS, KATO E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2008; 32:515-523.
- Dexter AR, Youngs IM. Soil physic toward 2000. *Soil and Tillage Research*. 1992; 24:101-106.
- Dexter AR. Advancs in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*. 1988; 11:199-238.

Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro; 1997.

Erickson AE. Tillage effects on soil aeration. American Society of Agronomy. 1982; 1:91-104.

Fabian AJ, Ottoni Filho TB. Determinação de capacidade de campo *in situ* ou através de equações de regressão. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 2000; 35:1029-1036.

Fezer KF. Atributos físicos do solo e relações hídricas para cultura do *Pinus taeda* L. e mata nativa sobre Latossolo, em Telêmaco Borba-PR [dissertação]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2013.

Fundação ABC. Relatório anual 2015. Paraná: Castro; 2015.

Grable AR, Siemer EG. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corns roots. Soil Science Society of America Proceedings. 1968; 32:180-186.

Gubiani PI, Reinert DJ, Reichert JM. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. Ciência Rural. 2006; 36:664-668.

Hillel D. Solo e água: fenômeno e princípios físicos. Porto alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970.

Kiehl EJ. Manual de edafologia. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979.

Lal R. Water management in various crop production systems related to soil. Soil and Tillage Research. 1994; 30:169-185.

Lapsch IF, Belinazzi JR R, Bertolini D, Espindola CR. Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 1991.

Libardi PL. Dinâmica da água no solo. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2005.

Marcolin CD. Propriedades físicas de Nitossolo e Latossolo argilosos sob plantio direto [dissertação]. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo; 2006.

Mesquita MGBF, Moraes SO. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. Ciência Rural. 2004; 34:963-969.

Prevedello CL. Programa Splintex para estimar a curva de retenção de água a partir da granulometria (composição) do solo. Versão 1.0. Curitiba: UFPR, 1999.

Reichardt K, Timm LC. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri, 2004.

Reinert DJ, Reichert JM. Propriedades físicas do solo. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

Scanlon BR, Nicot JP, Massmann JW. Soil gas movement in unsaturated systems. *Soil Physics Companion*. 2002; 1:297-341.

Scheraiber CF. Adaptação metodológica para a estimativa e caracterização das relações hídricas como suporte ao planejamento agrícola [dissertação]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2012.

Scherpinski C, Uribe-opazo MA, Vilas Boas MA.; Sampaio, S.C. & Johann, J.A. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. *Acta Scientiarum Agronomy*. 2010; 32:7-13.

Soil Survey Division Staff. Soil survey manual. Soil Conservation Service U.S. Departamento of Agriculture Handbook. 1993.

Stone LF, Silveira PM, Moreira JAA. Atributos físico-hídricos do solo sob plantio direto. Santo Antônio de Goiás, Embrapa arroz e feijão, 2006.

Tormena CA, Silva AP, Libardi PL. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*. 1998; 22:573-581.

Van Genuchten MT. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1980; 44:892-898.

3 CAPÍTULO II – DESEMPENHO DO MODELO AQUACROP NA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS SOJA E MILHO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS

3.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho verificar o desempenho do modelo AquaCrop para simular a produtividade das culturas da soja e milho na região dos Campos Gerais, em diferentes tipos de solo. As análises foram realizadas com dados de 21 e 32 experimentos para as culturas do soja e milho, respectivamente, realizados na Fundação ABC – Pesquisa e Desenvolvimento Agropecuário, dos anos safra entre 2006 e 2014, nas estações experimentais de Arapoti, Castro, Itaberá, Socavão e Ponta Grossa, nos Estados do Paraná e São Paulo. Os dados de entrada (clima, solo, cultura e manejo) necessários, coletados nas estações experimentais, foram inseridos no AquaCrop gerando-se as produtividades estimadas. As análises realizadas indicaram que o AquaCrop respondeu positivamente às expectativas quanto a simulação das produtividades de soja e milho na região dos Campos Gerais, tendo desempenhos predominantemente entre “muito bom” e “ótimo”. Os maiores erros de estimativa da produtividade da soja ocorreram nas safras que tiveram baixa produtividade real. O AquaCrop necessita de ajustes e calibração nos coeficientes que penalizam a produtividade potencial na região dos Campos Gerais, quando os fatores climáticos que afetam a produtividade são mais severos. O modelo mostrou-se mais indicado para realizar simulações da produtividade de soja, em relação a de milho nas localidades analisadas dos Campos Gerais. O tipo de solo interferiu nos resultados das análises do AquaCrop, sendo que os Latossolos apresentaram melhor desempenho e maiores correlações comparado aos demais solos estudados.

Palavras-chave: *software*; modelo matemático; estimativa; culturas agrícolas.

3.2 ABSTRACT

The objective of this study was to verify the performance of AquaCrop model to simulate the yield of soybean and corn crop in the Campos Gerais region, in different soil types. Analysis were performed with 21 and 32 experiments data for corn and soybeans, respectively, carried out on ABC Foundation - Research and Agricultural Development, between 2006 and 2014, at the experimental stations of Arapoti, Castro, Itaberá, Socavão and Ponta Grossa, in the states of Paraná and São Paulo. The input data (climate, soil, crop and management) collected at experimental stations, were used as input variables in the AquaCrop model, by generating the estimated yield. The software AquaCrop met the expectations of soybean and corn yields simulation in the Campos Gerais region, showing, at least, "very good" performances. The highest errors of estimated yield occurred in crops that have low real productivity. We recommend adjustments and calibration of the coefficients which penalize the potential productivity in the Campos Gerais region, severe affected by climatic factors. The model was best suited to perform simulations of soybean productivity rather than to corn at Campos Gerais region. The soil type affected the estimation analysis, with the Latosols showing better performance and the highest coefficients of correlation, when compared to other soil types.

Key-words: software; mathematical model; estimate; agricultural crops.

3.3 INTRODUÇÃO

Os modelos computacionais que simulam o desenvolvimento e produtividade de culturas agrícolas ganharam importância e são cada vez mais utilizados nos países que possuem agricultura tecnificada, contribuindo para a realização de estudos e aumento da produtividade de diversas culturas (Whisler et al., 1986; Pessoa et al., 1997).

A vantagem da simulação da produtividade de culturas agrícolas está na possibilidade de previsão do desenvolvimento da cultura no decorrer da safra ou antes mesmo de implantá-la. Com isso, pode-se planejar a época correta de aplicação de insumos e uso de técnicas mais adequadas. A maioria dos modelos de produção simulam o balanço hídrico no sistema solo-planta-atmosfera. Aliado ao uso de bancos de dados climáticos, existem modelos capazes de estimar o aporte e perda de água e nutrientes do sistema, no decorrer do tempo e, com isso, estimar a produtividade de diversas culturas agrícolas (Sentelhas et al., 2001; Tojo-Soler et al., 2001; Mello & Caimi, 2008).

Além disso, os modelos que simulam a produtividade de culturas agrícolas são importantes para a pesquisa, possibilitando o teste em cenários distintos, como variações de clima, solos, insumos e técnicas de manejo. Logo, inúmeros experimentos podem ser simulados sem que haja custos de implantação, manutenção e mão-de-obra, além do tempo reduzido (Whisler et al., 1986; Tojo-Soler et al., 2001; Mello & Caimi, 2008).

Os modelos computacionais são formulados a partir de relações empíricas e físicas existente entre grandezas, previamente observadas em experimentos a campo. Uma vez formulado, o modelo passa por um processo de calibração e validação até representar a produção real com alto grau de precisão. Somente após validado, o modelo poderá ser utilizado com confiança para determinado local e cultura agrícola (Pessoa et al., 1997; Bernardon & Calgaron, 2007).

A principal dificuldade no uso de modelos de simulação agrícola está na complexidade da maioria dos modelos e *softwares* existentes. Seu uso geralmente requer alto grau de conhecimento na área da modelagem e programação de sistemas, o que não condiz com o grau de instrução de técnicos e produtores agrícolas, principalmente nos países menos desenvolvidos. Outro problema

encontrado, é a baixa abrangência dos modelos, ou seja, modelos formulados para um número reduzido de culturas e/ou tipos de solo e clima (Sentelhas et al., 2001; Mello & Caimi, 2008; Pavan et al., 2009; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009).

Com o objetivo de aumentar a aplicabilidade e uso de modelos de simulação de produção, pesquisadores vinculados à FAO (*Food and Agriculture Organisation*) desenvolveram o *software* AquaCrop. O programa computacional foi desenvolvido utilizando equacionamento e simplificações que reduziram a quantidade de dados necessários, além de requerer, como entrada, dados de mais fácil obtenção. O *software* possui um banco de dados interno, contendo informações de diversos locais e culturas previamente validadas. Além disso, conta com *layout* simplificado e autoexplicativo (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009).

Pesquisadores consideram o modelo AquaCrop evoluído devido à alguns aspectos específicos. O primeiro trata da separação da evapotranspiração (*ET*) em evaporação do solo (*E*) e transpiração da cultura (*Tr*), já que a transpiração é a fração de água que realmente passa pelo metabolismo do vegetal e contribui para o acúmulo de matéria seca. A separação da *ET* é importante, pois evita o efeito da contabilização da água não produtiva. O segundo aspecto refere-se à estimativa da produtividade (*Y*) a partir da produção de biomassa (*B*) e do índice de colheita (*HI*), permitindo a distinção entre fatores ambientais que influem na produção e eficiência como característica da própria cultura na conversão da biomassa (Raes et al., 2012):

$$B = WP \cdot \sum_{i=1}^n Tr_i$$

Sendo: *B* – biomassa acumulada (kg); *WP* – parâmetro de produção pela água (kg m² mm⁻¹); *Tr_i* – transpiração da cultura no *i*-ésimo intervalo de período (mm); *n* – período considerado (unidade).

Ao contrário de modelos considerados mais complexos, o AquaCrop simula a expansão do dossel (*CC*) ao invés do aumento do índice de área foliar (*IAF*). A simulação da expansão do dossel simplifica o modelo, pois o *IAF* é considerado um dado de complexa obtenção. Além disso, a simulação da expansão do dossel contabiliza a radiação incidente apenas nas folhas que não estão sombreadas e, assim, aumenta a precisão na contabilização da taxa fotossintética da cultura. Uma

vez estimado o acúmulo de biomassa, calcula-se o rendimento da cultura (Steduto et al., 2008; Raes et al., 2012):

$$Y = B \cdot HI$$

Sendo: Y – rendimento da cultura (kg ha^{-1}); B – biomassa acumulada (kg); HI – índice de colheita da cultura (adimensional).

A literatura apresenta diversos exemplos de validação e simulações com o modelo AquaCrop, que obtiveram resultados satisfatórios (Geerts et al., 2009; Abedinpour et al., 2012; Mkhabela & Bullock, 2012; Iqbal et al., 2014). Logo, o AquaCrop foi aplicado em diversas culturas e países, o que evidenciou sua robustez e abrangência, porém são poucos os estudos visando a sua utilização em cenários brasileiros.

Tendo em vista as contribuições do AquaCrop na gestão de lavouras e pesquisa, e o pouco conhecimento sobre sua eficácia em estudos no Brasil, teve-se por objetivo no presente estudo verificar o desempenho do modelo AquaCrop para simular a produtividade das culturas da soja e milho na região dos Campos Gerais, em diferentes tipos de solo.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Descrição das áreas experimentais

O presente trabalho foi realizado para região dos Campos Gerais-PR, escolhida por ser referência na produção de grãos e onde se localiza a “Fundação ABC – Pesquisa e Desenvolvimento Agropecuário”, importante centro de pesquisa agropecuária, que viabilizou a realização das análises necessárias disponibilizando dados históricos de cultivos do milho e soja (safras 2006/07 a 2013/14). As estações experimentais utilizadas estão localizadas nos municípios de Arapoti, Castro, Ponta Grossa e distrito de Socavão, pertencentes ao Estado do Paraná e, o município de Itaberá, pertencente ao Estado de São Paulo. Foram utilizados dados observados nas parcelas experimentais do Setor de Agrometeorologia. Em todas as parcelas o relevo é plano a suave ondulado. O sistema de preparo do solo é o plantio direto com cobertura morta vegetal homogênea. Utiliza-se o sistema de rotação de culturas, alternado entre soja e milho no verão, e trigo e aveia preta no inverno. O

controle de pragas e doenças é realizado conforme o padrão na região e a fertilização é realizada de modo a suprir a totalidade dos nutrientes necessários ao pleno desenvolvimento das culturas.

A classificação de solo foi obtida a partir dos mapas de solos fornecidos pela Fundação ABC, com escala 1:10.000 (TABELA 3.1). Os tipos climáticos foram identificados em Alvares et al. (2013), que utilizou a classificação climática de Köppen para essa finalidade. A localização, coordenadas geográficas e altitude foram mensurados com aparelho de GPS. A textura do solo foi determinada com amostras deformadas de solo, utilizando o método do densímetro, conforme a metodologia da Embrapa (1997), no Laboratório de Física do Solo da UFPR.

TABELA 3.1 – CARACTERIZAÇÃO QUANTO À LOCALIZAÇÃO, SOLO, CLIMA, COORDENADAS GEOGRÁFICAS E ALTITUDES DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC.

Município	Estado	Solo	Textura	Clima	Latitude ----- (graus)	Longitude -----	Altitude (m)
Arapoti	Paraná	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	Franco argilo- arenoso	Cfa/Cfb ⁽¹⁾	24,18° S	49,85° W	902
Castro	Paraná	CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Argiloso/ Muito argiloso	Cfb	24,85° S	49,93° W	1001
Itaberá	São Paulo	PLANOSSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Argiloso/ Muito argiloso	Cfa	24,07° S	49,15° W	735
Ponta Grossa	Paraná	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	Argilo- arenoso	Cfb	25,01° S	50,15° W	1000
Socavão	Paraná	ORGANOSSOLO MÉSICO Sápico típico	Argiloso/ Muito argiloso	Cfb	24,68° S	49,75° W	1026

⁽¹⁾ Local de transição climática. FONTE: A autora (2016)

3.4.2 Dados de entrada necessários nas simulações do AquaCrop

Para verificar o desempenho do modelo AquaCrop em condições de produção agrícola, foram realizadas 21 e 32 simulações da produção da cultura do milho e soja (kg ha^{-1}), respectivamente, para posterior comparação com as produtividades reais (kg ha^{-1}) de experimentos previamente realizados a campo, nas safras 2006/07 a 2013/14.

Para iniciar a simulação o modelo AquaCrop necessita de dados de entrada referentes ao clima, cultura, solo e manejo (Raes et al., 2009):

a) Clima: Os dados climáticos utilizados foram provenientes das estações agrometeorológicas anexas a cada Campo Experimental. Os dados de temperaturas mínimas e máximas do ar ($^{\circ}\text{C}$) e precipitação pluvial (mm dia^{-1}) foram obtidos dos bancos de dados climáticos fornecidos pelo Setor de Agrometeorologia da Fundação ABC. A evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}) foi estimada com o método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). A concentração média anual de CO_2 na atmosfera (ppm) já se encontra disponível no AquaCrop, tendo dados provenientes de mensurações no observatório de Mauna Loa, Havaí (Raes et al., 2009);

b) Cultura: As variáveis de entrada inseridas no modelo, referentes às culturas do milho e soja, foram a data do plantio, duração de cada ciclo fenológico (dia), população de plantas (plantas ha^{-1}) e comprimento médio efetivo das raízes (cm). Os dados foram provenientes de séries históricas de experimentos realizados nas estações experimentais da Fundação ABC, nas safras de 2006/07 a 2013/14;

c) Solo: O modelo considera a distinção de até cinco camadas ou horizontes no perfil do solo. Porém, no presente estudo as espessuras de solo estudadas foram 0,0-0,10 m; 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m. A distinção teve a intenção de atingir o comprimento efetivo do sistema radicular das culturas estudadas. Para cada espessura, foram inseridos no modelo dados de condutividade hidráulica saturada (mm dia^{-1}) e umidades volumétricas na saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e do solo no momento do plantio ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, estimada conforme Souza et al., 2013). Os dados de solo foram obtidos a partir de amostras de solo coletadas nos campos experimentais da Fundação ABC, em 2015 (Pesquisadores que desenvolveram o AquaCrop consideram que os valores dos atributos físico-hídricos do solo não variam, de forma a prejudicar a estimativa de produtividade, dentro de um período de dez anos). Para cada parcela experimental de 50 x 100 metros, foram definidos cinco pontos experimentais representativos. Para cada ponto e espessura de solo estudada foram coletadas uma amostra deformada e indeformada, totalizando 75 amostras de solo (5 estações experimentais, 5 pontos experimentais e 3 profundidades). As umidades volumétricas na saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foram determinados conforme Embrapa (1997), no Laboratório de Manejo de Bacias Hidrográficas da UFPR, utilizando amostras indeformadas de solo, coletadas com anéis volumétricos de 5 cm de diâmetro e 3 cm de altura. A umidade do solo na

capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi determinada quando ocorreu equilíbrio da água na mesa de tensão, na tensão de 0,01 MPa. A umidade volumétrica no ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi estimado na curva de retenção de água no solo, gerada com o *software* de pedotransferência SPLINTEX (Prevedello, 1999). Considerou-se como ponto de murcha permanente a umidade volumétrica na tensão de 1,5 MPa. A condutividade hidráulica saturada (mm dia^{-1}) foi determinada em permeâmetro de carga constante, conforme Embrapa (1997), no Núcleo de Atividades de Engenharia em Biosistemas (NAEB) da UFPR. Maiores detalhes sobre alguns aspectos metodológicos podem ser vistos nos APÊNDICES 5 a 6.

O conteúdo volumétrico de água no momento do plantio ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi estimado em planilha desenvolvida especialmente para esta finalidade. No instante anterior ao plantio, em que houve grande volume precipitado, foi considerado que o solo atingiu a umidade na capacidade de campo. A partir desta data iniciou-se a contabilização das entradas e saídas diárias de água no solo, até o momento do plantio (Souza et al., 2013).

d) Manejo: O AquaCrop permite a inserção de variáveis como a presença e tipo de cobertura do solo (%), utilização e tipo de irrigação, frequência de irrigação (dias), volume de irrigação (mm) e qualidade da água de irrigação. O modelo também considera a possibilidade de quatro níveis de fertilização (alto, próximo ao ideal, médio e baixo). Além disso, há possibilidade de detalhamento da fertilização, sendo possível inserir ou testar as doses de cada nutriente separadamente (Raes et al., 2009). No entanto, no presente estudo a irrigação não foi considerada e o nível de fertilização foi considerado próximo ao ideal. Por se tratar de áreas em sistema de plantio direto, a cobertura do solo foi considerada fixa em 50%, em todas as estações experimentais.

Os dados de entrada descritos anteriormente foram inseridos no AquaCrop formando um banco de dados de solo e clima para cada campo experimental, nas safras entre 2006 e 2014. Os dados referentes ao manejo foram iguais para todas as simulações, assim houve a necessidade de se alterar apenas os dados referentes à cultura nas simulações.

3.4.3 Análises estatísticas

As produtividades estimadas (kg ha^{-1}) e reais (kg ha^{-1}) foram comparadas estatisticamente, considerando: análise de regressão linear, coeficiente de correlação, erros absoluto médio e relativo, índices “ d ” (Willmott, 1982) e “ c ” (Camargo e Sentelhas, 1997). Os resultados das análises foram organizados por município, afim de verificar a possibilidade de relacionar o resultado com o tipo de solo de cada Estação Experimental.

– Cálculo do erro absoluto médio (Ea):

$$Ea = \frac{\sum_{i=1}^n |Yr_i - Ys_i|}{n}$$

– Cálculo do erro relativo (Er):

$$Er = \frac{\sum_{i=1}^n |Yr_i - Ys_i|}{\sum_{i=1}^n Ys_i} \cdot 100$$

– Cálculo do coeficiente de correlação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(Yr_i - \bar{Yr}) \cdot (Ys_i - \bar{Ys})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Yr_i - \bar{Yr})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Ys_i - \bar{Ys})^2}}$$

– Cálculo do índice “ d ” de Willmott (1982):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Ys_i - \bar{Yr})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (|Ys_i - \bar{Yr}| + |Yr_i - \bar{Yr}|)^2}}$$

– Cálculo do índice “ c ” de Camargo e Sentelhas (1997):

$$c = d \cdot r$$

Sendo: Ea – erro absoluto médio (kg ha^{-1}); Er – erro relativo (%); r – coeficiente de correlação de Pearson (adimensional); d – índice “ d ” Willmott (adimensional); Yr_i – valores reais médios de produtividade observados no i -ésimo experimento (kg ha^{-1}); Yr_i – valores simulados de produtividade no i -ésimo experimento (kg ha^{-1}); n –

número de experimentos no município (adimensional); c – índice “ c ” de Camargo e Sentelhas (adimensional).

Os valores do índice “ c ” indicam o seguinte desempenho do modelo testado: “ótimo” (“ c ” $> 0,85$); “muito bom” ($0,76 \leq “c” \leq 0,85$); bom ($0,66 \leq “c” \leq 0,75$); “mediano” ($0,61 \leq “c” \leq 0,65$); “sofrível” ($0,51 \leq “c” \leq 0,60$); “mau” ($0,41 \leq “c” \leq 0,50$); e, “péssimo” (“ c ” $\leq 0,40$).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Análises dos erros e associação entre Y_r vs Y_s para cultura da soja

Considerando apenas a cultura da soja, os experimentos realizados no município de Arapoti indicaram erros relativos (Er) inferiores a 10% entre a produtividade real e estimada (TABELA 3.2 e FIGURA 3.1a), em seis das oito safras. Os maiores erros ocorreram na safra 2011/12, em que houve baixa produtividade real. A queda de produtividade provavelmente ocorreu devido à ausência de precipitação nos períodos de semeadura (17 a 24/10/2011 e 01 a 10/11/2011). Como as semeaduras em dois experimentos ocorreram em 21/10/2011 e 03/11/2011, acredita-se que a umidade no solo não foi a ideal para a germinação das sementes. Segundo Embrapa (2004), a semente de soja necessita absorver pelo menos 50% de seu peso em água para assegurar bom percentual germinativo. Paredes et al. (2015) verificaram que o AquaCrop é sensível quanto à umidade do solo no momento do plantio. Assim, pequena variação na umidade pode causar redução na produtividade estimada com o modelo quando há deficiência hídrica na fase inicial do cultivo. O AquaCrop considera que a umidade no momento do plantio afeta diretamente a porcentagem de germinação (Raes et al., 2009). Portanto, acredita-se que AquaCrop intensificou o efeito da falta de umidade no solo no momento do plantio sobre a porcentagem de germinação das sementes de soja em Arapoti.

Em Castro os maiores erros também ocorreram nas safras de baixa produtividade real (aproximadamente 2500 kg ha⁻¹). Na safra 2012/13, os dois experimentos em que o plantio foi adiantado (21 e 26/11/2012) apresentaram os maiores erros (TABELA 3.2 e FIGURA 3.1b). Como não houve evidências de déficit hídrico na safra, a queda de produtividade provavelmente deveu-se às altas

temperaturas nas primeiras semanas após a emergência das plantas (02 a 10/12/2012). Raes et al. (2009) consideram que a temperatura limite superior ao desenvolvimento da soja é de 30 °C e, no período citado, verificou-se temperaturas superiores à este valor. É importante observar que nos experimentos da mesma safra, em que não houve adiantamento no plantio e a temperatura média não ultrapassou o limite de 30 °C, a produtividade ficou próxima a 4000 kg ha⁻¹. Ferreira et al. (2007) afirmam que variação de temperatura média a partir de 1 °C já é capaz de alterar significativamente o índice de colheita (*HI*) da soja em qualquer um de seus ciclos fenológicos. A alteração do índice de colheita afeta diretamente o valor da produtividade estimada. Paredes et al. (2015), em estudo para calibração do AquaCrop para cultivo de soja no norte da China, necessitou alterar o valor do índice de colheita de referência (*HI_o*) de 0,40 para 0,38. O *HI_o* é o índice para conversão de biomassa em produtividade quando não ocorre estresse hídrico. A alteração realizada pelo autor indicou que mesmo sem a ocorrência de déficit hídrico, existem fatores capazes de causar efeito significativo na produtividade, sendo necessário calibrar o *HI_o*. Os resultados obtidos foram interessantes e indicam que o AquaCrop precisará ser testado em trabalhos futuros para verificar a sua eficiência sob condições de temperatura atmosférica acima do limite superior para soja.

Em Itaberá, também se observou que os maiores erros de estimativa da produtividade ocorrem nos experimentos que tiveram baixas produtividades (TABELA 3.2 e FIGURA 3.1c), decorrentes de períodos de déficit hídrico. Segundo Couto et al. (1986), as perdas em produção de soja variam com a intensidade e duração do estresse hídrico, bem como dependem do estágio de desenvolvimento da planta. Assim, o AquaCrop deve considerar que o estresse hídrico observado afetou a cultura com maior severidade.

Os menores erros absoluto e relativo (< 10%) ocorreram no município de Ponta Grossa (TABELA 3.2 e FIGURA 3.1d). Como nos outros municípios, o maior erro foi verificado na safra de menor produtividade (2012/13). Porém, verificou-se na safra 2012/13 que o erro foi menor comparado aos demais municípios. Provavelmente, os menores erros de estimativa da produtividade estão associados com as condições do solo da localidade, já que as condições climáticas foram similares às demais localidades da região.

TABELA 3.2 – PRODUTIVIDADES REAIS MÉDIAS OBSERVADAS (Yr_i) E SIMULADA (Ys_i) NO AQUACROP PARA A CULTURA DA SOJA, E ERROS ABSOLUTO (Ea) E RELATIVO (Er) OBTIDOS EM CADA EXPERIMENTO INSTALADO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

Local	Solo	Safra	Yr_i	Ys_i	$Ea = Ys_i - Yr_i$	Er
					(kg ha ⁻¹)	(%)
Arapoti	LVAd	2013/14	4964	4801	-163,33	3,40
Arapoti	LVAd	2013/14	4493	4314	-179,28	4,16
Arapoti	LVAd	2012/13	5066	4751	-314,85	6,63
Arapoti	LVAd	2012/13	4367	4041	-326,13	8,07
Arapoti	LVAd	2011/12	2848	3586	737,75	20,57
Arapoti	LVAd	2011/12	3298	3921	622,68	15,88
Arapoti	LVAd	2010/11	4892	4583	-308,73	6,74
Arapoti	LVAd	2010/11	4454	4337	-117,33	2,71
Castro	CXbd	2013/14	3285	3317	32,08	0,97
Castro	CXbd	2012/13	2679	3304	625,03	18,92
Castro	CXbd	2012/13	3918	3989	70,93	1,78
Castro	CXbd	2012/13	2728	3297	569,40	17,27
Castro	CXbd	2012/13	3408	3476	68,28	1,96
Castro	CXbd	2011/12	3958	3968	9,60	0,24
Castro	CXbd	2011/12	3434	3436	2,50	0,07
Castro	CXbd	2011/12	3923	4048	125,15	3,09
Castro	CXbd	2011/12	3656	3698	41,88	1,13
Castro	CXbd	2010/11	3275	3300	25,50	0,77
Castro	CXbd	2010/11	3655	3716	61,20	1,65
Castro	CXbd	2010/11	3501	3588	87,43	2,44
Castro	CXbd	2010/11	3278	3381	103,16	3,05
Castro	CXbd	2007/08	3370	3422	51,85	1,52
Itaberá	SXd	2013/14	3372	3467	95,27	2,75
Itaberá	SXd	2013/14	2539	3301	761,83	23,08
Itaberá	SXd	2013/14	2833	3691	857,91	23,24
Itaberá	SXd	2013/14	4289	4061	-227,65	5,61
Itaberá	SXd	2012/13	4343	4467	123,68	2,77
Itaberá	SXd	2011/12	4520	4368	-152,35	3,49
Ponta Grossa	LVAd	2012/13	2743	3030	287,23	9,48
Ponta Grossa	LVAd	2011/12	4378	4489	111,23	2,48
Ponta Grossa	LVAd	2010/11	4677	4802	125,40	2,61
Ponta Grossa	LVAd	2006/07	3557	3591	34,32	0,96

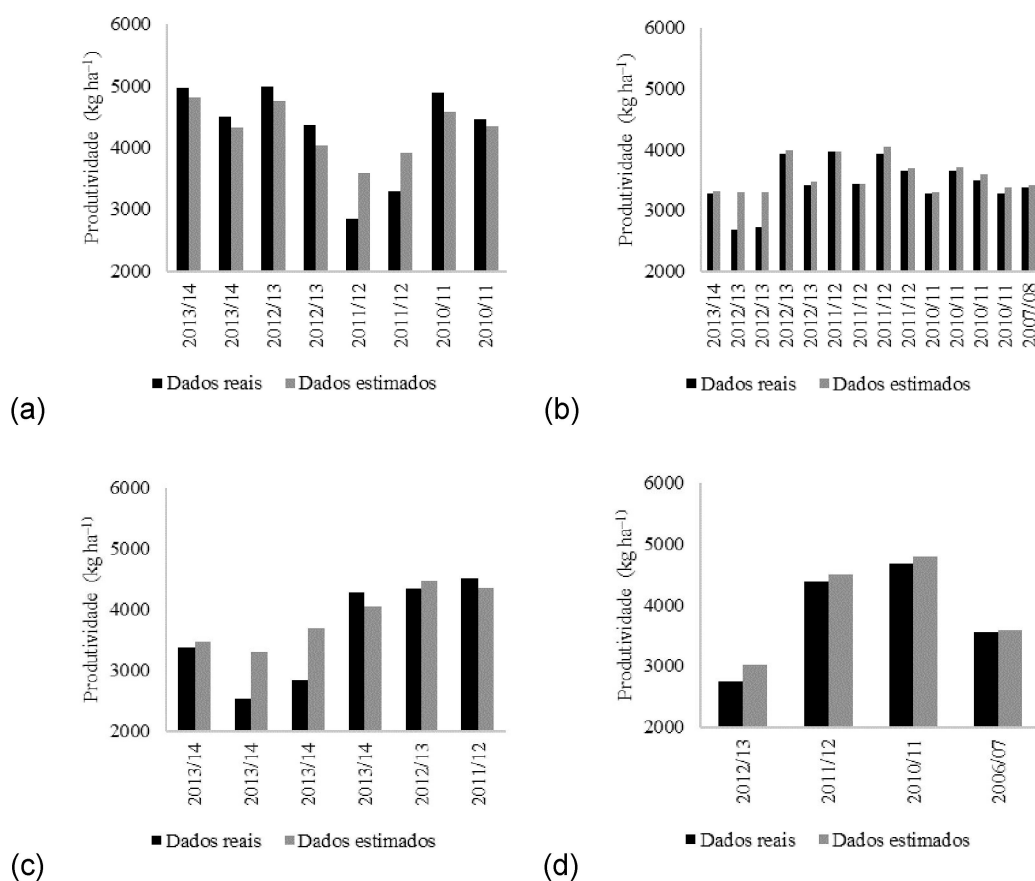
FONTE: A autora (2016)

Os resultados obtidos sugerem que existem fatores ligados à baixa produtividade de soja que o AquaCrop não é capaz de identificar ou os considera de forma menos intensa. Logo, acredita-se que seja necessário calibrar coeficientes relacionados ao estresse hídrico e térmico que penalizam a produtividade potencial com o modelo. Além disso, são necessários mais estudos relacionados à calibração do HI_o e ao uso do AquaCrop em solos com diferentes características físico-hídricas.

Todas as simulações em Castro e Ponta Grossa superestimaram o valor de produtividade. Os dois municípios se localizam em maiores latitudes, possuem clima mais frio e estão em menores altitudes em relação aos demais. O resultado mostra

um possível ajuste que o modelo deve receber, relacionado a aumento nos coeficientes de penalização da produtividade potencial nas condições de clima ameno.

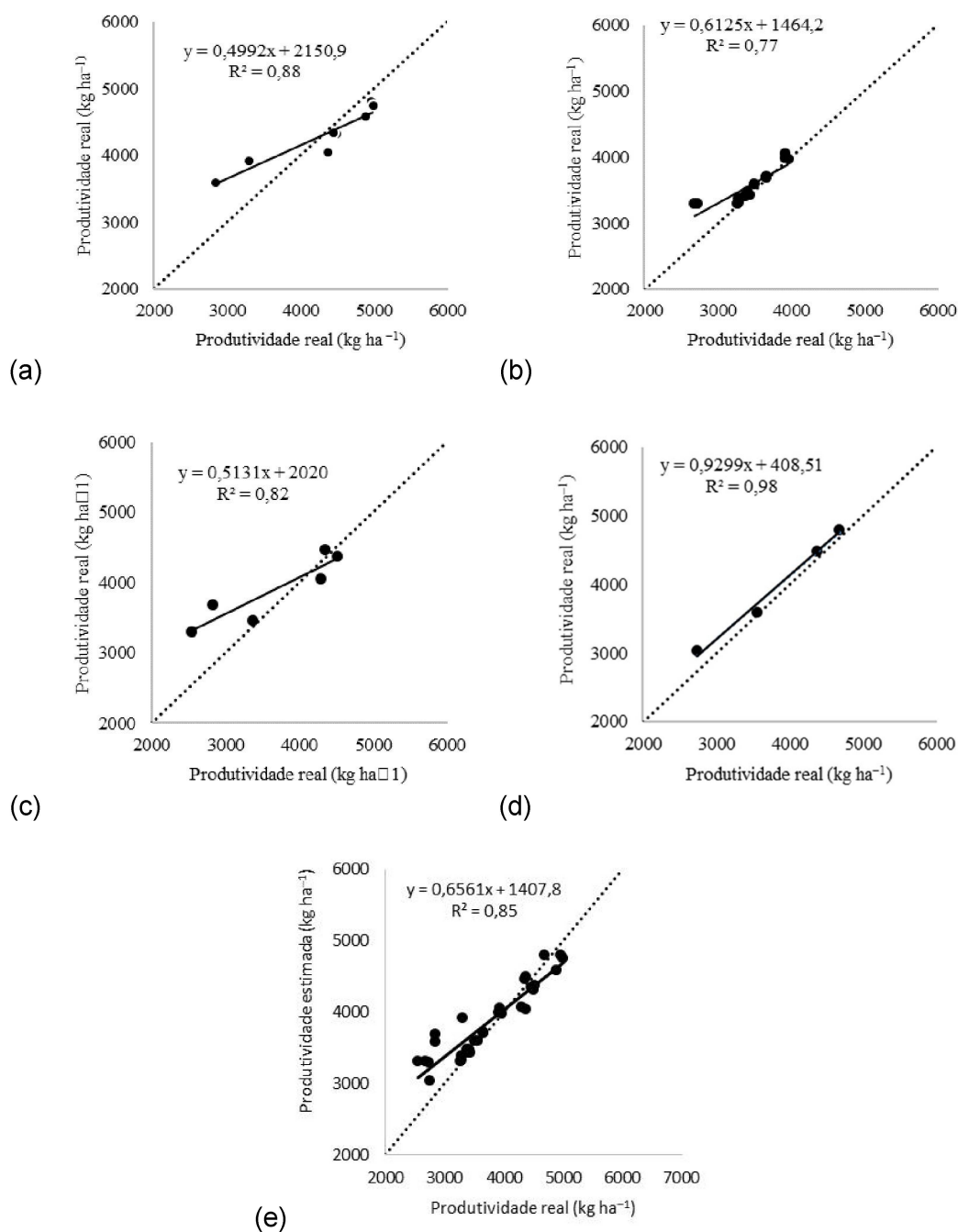
FIGURA 3.1 – PRODUTIVIDADE MÉDIA REAL E ESTIMADA COM O AQUACROP PARA CULTURA DA SOJA, NOS MUNICÍPIOS DE: a) ARAPOTI-PR; b) CASTRO-PR; c) ITABERÁ-SP; e, d) PONTA GROSSA-PR.



FONTE: A autora (2016)

Apesar de haver erros absolutos de até 857 kg ha⁻¹ na simulação da produtividade de soja com o AquaCrop, observou-se alto coeficiente de determinação ($R^2 > 0,77$) entre a produtividade real e simulada para os quatro municípios estudados (FIGURA 3.2). A associação conjunta entre Y_r vs Y_s dos 32 experimentos na região dos Campos Gerais (Arapoti, Castro, Itaberá e Ponta Grossa) obteve $R^2 = 0,85$ (FIGURA 3.2e).

FIGURA 3.2 – ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ENTRE A PRODUTIVIDADE MÉDIA REAL E ESTIMADA COM O AQUACROP, PARA A CULTURA DA SOJA, NOS MUNICÍPIOS DE: a) ARAPOTI-PR; b) CASTRO-PR; (c) ITABERÁ-SP; d) PONTA GROSSA-PR; E, e) ARAPOTI, CASTRO, ITABERÁ E PONTA GROSSA JUNTOS (32 EXPERIMENTOS).



FONTE: A autora (2016)

Realizando-se um cenário em que foram desconsideradas as safras com problemas de baixas produtividades, devido à deficiência hídrica ou temperaturas elevadas (safras 2011/12 em Arapoti, 2012/13 em Castro e 2013/14 em Itaberá), o coeficiente de determinação R^2 aumentaram, sendo iguais 0,92; 0,98; 0,89 e 0,99 para Arapoti, Castro, Itaberá e Ponta Grossa, respectivamente. Nessa condição, a associação conjunta entre Y_r vs Y_s dos 32 experimentos resultou $R^2 = 0,95$.

Logo, embora o AquaCrop ainda necessite de ajustes, pode-se afirmar que as associações obtidas para as produtividades (Y_r vs Y_s) foram elevadas e o modelo tem grande potencial para ser calibrado e validado para a cultura da soja na região dos Campos Gerais.

3.5.2 Análises de erro e associação entre Y_r vs Y_s para cultura do milho

Ao contrário do verificado para cultura da soja, em que os maiores erros absoluto e relativo ocorreram para as safras menos produtivas, os maiores erros verificados nos experimentos com a cultura do milho ocorreram sem padrão definido (TABELA 3.3 e FIGURA 3.3).

Os maiores erros absoluto e relativo de estimativa da produtividade da cultura do milho ocorreram no distrito de Socavão (TABELA 3.3 e FIGURA 3.3b), em dois experimentos da safra 2012/13, com erro de 973,7 kg ha⁻¹ (7,74%) e 1692 kg ha⁻¹ (13,7%). Hsiao (2009) afirma que erros absolutos acima de 1000 kg ha⁻¹, para a cultura do milho, são considerados além dos limites de confiança.

A safra 2012/13 registrou períodos que caracterizam estresse hídrico considerável entre a floração e o enchimento de grãos, com precipitação de apenas 3,2 mm entre 20/12/2012 e 13/01/2013 na região de Socavão. Segundo Matzenauer et al. (1995), no período da floração e enchimento de grãos a cultura de milho é mais sensível ao déficit hídrico. Magalhães (2006) considera que no período de enchimento de grãos ocorre o maior aporte de carboidrato nos grãos de milho. O processo está intimamente relacionado com a fotossíntese e apresenta demanda hídrica acentuada. Portanto, a ocorrência de estresse hídrico nos dois estádios relatados resultou em menor peso dos grãos e produtividade. O resultado evidencia que o AquaCrop provavelmente subestimou a intensidade com que o déficit hídrico atuou sobre os processos fotossintéticos na cultura do milho. Nas demais safras em

Socavão (2013/14 e 2011/12), o AquaCrop subestimou a produtividade. O solo do local tem alto conteúdo de matéria orgânica (Organossolo). Segundo Gregorich et al. (1994), a matéria orgânica do solo atua significativamente na retenção de água do solo e, conseqüentemente, no balanço hídrico. Nestas condições, provavelmente estes erros podem estar ligados à falta de recursos do próprio modelo em simular o efeito da matéria orgânica do solo sobre suas relações hídricas.

TABELA 3.3 – PRODUTIVIDADES REAIS MÉDIAS OBSERVADAS (Yr_i) E SIMULADA (Ys_i) NO AQUACROP PARA A CULTURA DO MILHO, E ERROS ABSOLUTO (Ea) E RELATIVO (Er) OBTIDOS EM CADA EXPERIMENTO INSTALADO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

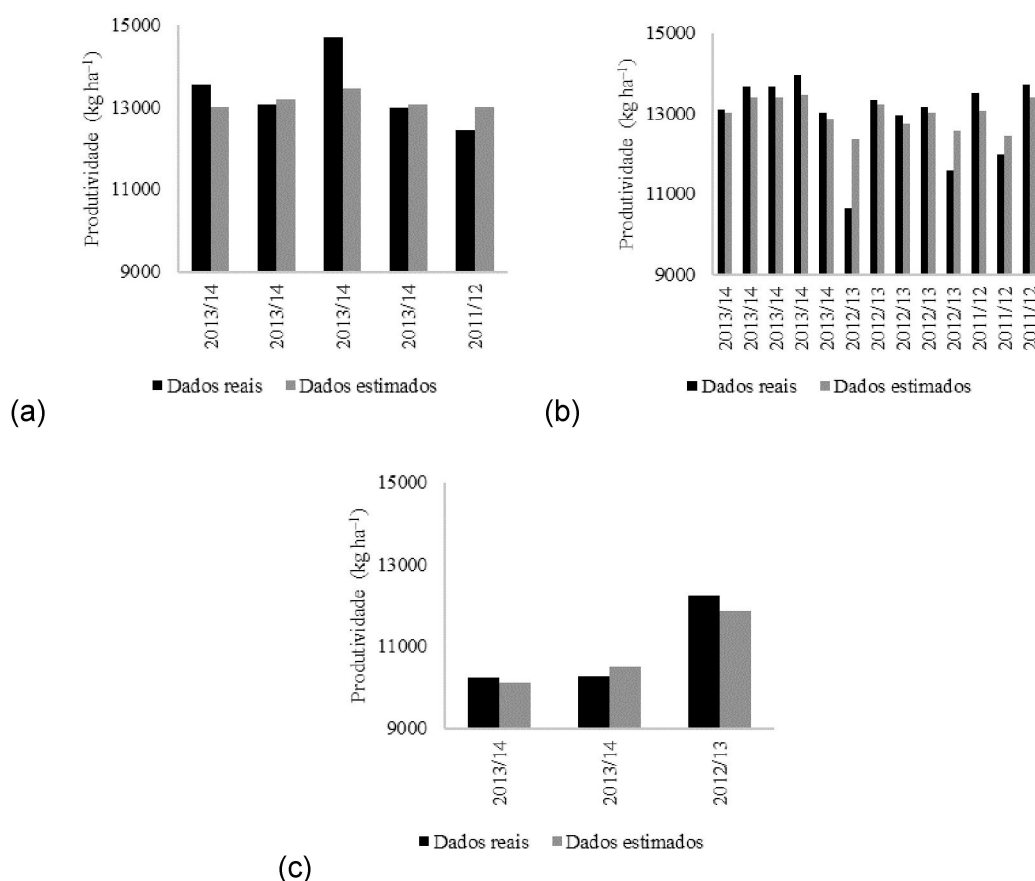
Local	Solo	Safra	Yr_i	Ys_i	$Ea = Ys_i - Yr_i$	Er
			----- (kg ha ⁻¹) -----		-----	(%)
Castro	CXbd	2013/14	13554	13002	-551,70	4,24
Castro	CXbd	2013/14	13078	13188	109,95	0,83
Castro	CXbd	2013/14	14681	13456	-1225,28	9,11
Castro	CXbd	2013/14	12987	13085	98,15	0,75
Castro	CXbd	2012/13	12453	13021	568,38	4,37
Socavão	OYs	2013/14	13110	12998	-111,59	0,86
Socavão	OYs	2013/14	13661	13406	-254,56	1,90
Socavão	OYs	2013/14	13674	13398	-275,86	2,06
Socavão	OYs	2013/14	13970	13466	-504,01	3,74
Socavão	OYs	2013/14	13002	12855	-147,22	1,15
Socavão	OYs	2012/13	10659	12352	1692,53	13,70
Socavão	OYs	2012/13	13341	13221	-120,35	0,91
Socavão	OYs	2012/13	12945	12745	-200,19	1,57
Socavão	OYs	2012/13	13155	13020	-134,79	1,04
Socavão	OYs	2012/13	11606	12580	973,70	7,74
Socavão	OYs	2011/12	13513	13056	-456,97	3,50
Socavão	OYs	2011/12	11981	12456	474,69	3,81
Socavão	OYs	2011/12	13713	13388	-324,64	2,42
Ponta Grossa	LVAd	2013/14	10233	10112	-120,75	1,19
Ponta Grossa	LVAd	2013/14	10262	10500	238,17	2,27
Ponta Grossa	LVAd	2012/13	12239	11851	-388,06	3,27

FONTE: A autora (2016)

Castro também apresentou resultados heterogêneos (TABELA 3.3 e FIGURA 3.3c), com erro absoluto e relativo pequeno 98,15 kg ha⁻¹ (0,75%) e grande 1225 kg ha⁻¹ (9,11%), conforme considerações de Hsiao (2009) (> 1000 kg ha⁻¹). Como o maior erro em Castro ocorreu na safra de maior produtividade (14681,28 kg ha⁻¹), acredita-se que o AquaCrop tenha maior dificuldade para simular as produtividades que se afastam da média. No entanto, os resultados são bem aleatórios, dificultando as interpretações, a exemplo do que ocorreu nos

experimentos conduzidos em Ponta Grossa, em que baixas e altas produtividades reais não proporcionaram maiores erros de estimativa com o modelo ($Er < 3,27\%$) (TABELA 3.3 e FIGURA 3.3c).

FIGURA 3.3 – PRODUTIVIDADE MÉDIA REAL E ESTIMADA COM O AQUACROP PARA CULTURA DO MILHO, NOS MUNICÍPIOS DE: a) CASTRO-PR; b) SOCAVÃO-PR; E, c) PONTA GROSSA-PR.

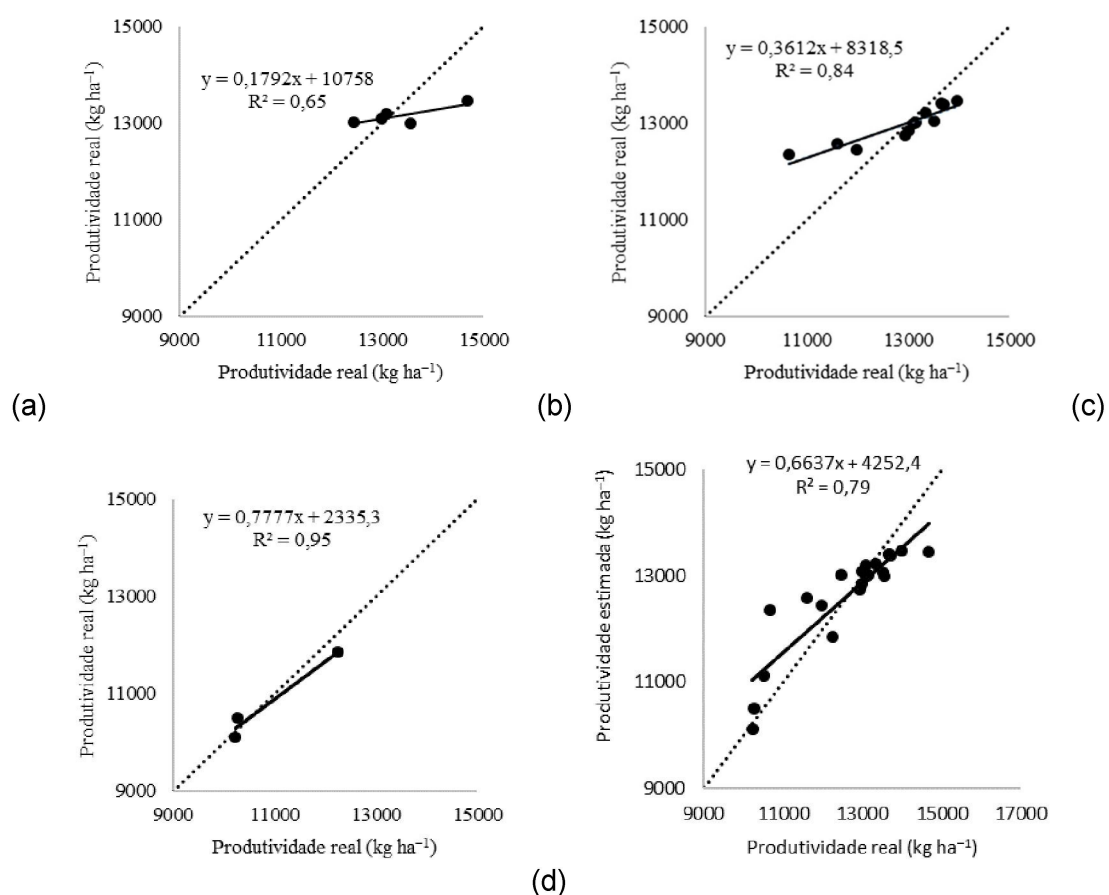


FONTE: A autora (2016)

Os menores erros de estimativa da produtividade para a cultura do milho ocorreram no município de Ponta Grossa, mas foi possível levantar apenas três experimentos com milho para o município. Por isso, não se pode afirmar a existência de alguma tendência. A menor variabilidade nas estimativas para Ponta Grossa provavelmente está relacionada com os atributos do solo, pois os demais fatores são similares entre os municípios. Logo, os resultados indicam que o AquaCrop se mostrou mais eficiente nas simulações em Latossolos, comparado aos demais solos estudados.

Apesar dos erros absoluto e relativo nas estimativas de produtividade para o milho com o AquaCrop e do menor número de safras experimentais disponíveis (TABELA 3.3), os coeficientes de determinação das relações Y_r vs Y_s ainda foram superiores a 0,65 (FIGURA 3.4). A associação conjunta entre Y_r vs Y_s dos 21 experimentos na região dos Campos Gerais (Castro, Socavão e Ponta Grossa) resultou em $R^2 = 0,77$ (FIGURA 3.4c). Os resultados evidenciaram que o modelo, após ajustes, também tem potencial para ser calibrado e validado para a cultura do milho na região dos Campos Gerais.

FIGURA 3.4 – ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ENTRE A PRODUTIVIDADE MÉDIA REAL E ESTIMADA COM O AQUACROP, PARA A CULTURA DE MILHO, NOS MUNICÍPIOS DE: a) CASTRO-PR; b) SOCAVÃO-PR; c) PONTA GROSSA-PR; e, d) CASTRO, SOCAVÃO E PONTA GROSSA JUNTOS (21 EXPERIMENTOS).



FONTE: A autora (2016)

3.5.3 Desempenho do conjunto de análises

As análises das relações entre Y_r vs Y_s indicaram desempenho predominantemente entre “muito bom” e “ótimo” para as culturas milho e soja, respectivamente, na região dos Campos Gerais (TABELA 3.4). De forma geral, os coeficientes de correlação (r) obtidos indicaram boa associação entre os valores Y_r vs Y_s para a cultura da soja ($r > 0,88$) e milho ($r > 0,81$). Logo, os desempenhos poderiam ter sido melhores se o índice de concordância (índice “ d ”) fossem maiores. O índice “ d ” é uma medida da distância em que os pontos da associação Y_r vs Y_s estão da reta de 45°, estando mais ligado ao processo de calibração do modelo. Logo, acredita-se que esse aspecto pode ser bastante melhorado em futuros trabalhos realizados com o AquaCrop na região dos Campos Gerais.

O melhor desempenho do AquaCrop ocorreu no município de Ponta Grossa para as culturas da soja e milho (TABELA 3.4). Os resultados ocorreram nas estações experimentais cujo solo possui classificação Latossolo Vermelho Distrófico típico e os desempenhos obtidos nas simulações classificaram-se como “ótimo”.

Os desempenhos para a cultura da soja foram iguais ou superiores a “muito bom”, indicando resultados muito promissores (TABELA 3.4). É importante observar também que os resultados foram satisfatórios em vários tipos de solos, classificados como Latossolo Vermelho Distrófico típico (Arapoti), Cambissolo Háplico Distrófico típico (Castro), Planossolo Háplico Distrófico típico (Itaberá) e Latossolo Vermelho Distrófico típico (Ponta Grossa). Araújo et al. (2011) realizando o ajuste de equações água-cultura em Ponta Grossa, em área contendo solo Latossolo Vermelho Distrófico típico, textura argilosa, também obtiveram resultados satisfatórios. No entanto, após uma série de desdobramentos dos dados, foram obtidos apenas resultados predominantemente “bom” a “muito bom”, com a equação água cultura de Stewart e Jensen.

O pior desempenho para a cultura do milho ocorreu em Castro (“Mau”) (TABELA 3.4). Assim, embora Socavão e Ponta Grossa tenham ficado com desempenho “bom” e “ótimo”, respectivamente, considera-se que as análises com a cultura do milho precisam ser melhor avaliadas, aguardando inclusive um número maior de safras para permitir a obtenção de resultados mais conclusivos. É interessante observar também, que os resultados foram obtidos em três tipos de

solos, classificados como Cambissolo Háplico Distrófico típico (Castro), Latossolo Vermelho Distrófico típico (Ponta Grossa) e Organossolo Mésico Sápico típico (Socavão). Logo, baseando-se inclusive na literatura, considera-se que os resultados obtidos representam um avanço para a estimativa da produtividade da cultura do milho na região.

TABELA 3.4 – ERROS ABSOLUTO (Ea) E RELATIVO (Er), COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (r), ÍNDICES “ d ” DE WILLMOTT (1982), “ c ” DE CAMARGO E SENTELHAS (1997) E DESEMPENHO ENTRE AS PRODUTIVIDADES REAIS MÉDIAS OBSERVADAS (Yr_i) E SIMULADA NO AQUACROP (Ys_i), PARA AS CULTURAS DA SOJA E MILHO, OBTIDOS PARA CADA EXPERIMENTO INSTALADO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

Cultura	Local	Ea (kg ha ⁻¹)	Er (%)	R ---- (adimensional) ----	“ d ”	“ c ”	Desempenho
Soja	Arapoti	337	0,981	0,939	0,876	0,823	"Muito bom"
Soja	Castro	134	0,268	0,880	0,864	0,761	"Muito bom"
Soja	Itaberá	370	1,583	0,909	0,843	0,765	"Muito bom"
Soja	Ponta Grossa	140	0,877	0,994	0,987	0,981	"Ótimo"
Soja	Campos Gerais ⁽¹⁾	230	0,186	0,925	0,923	0,854	"Ótimo"
Milho	Castro	511	0,777	0,811	0,518	0,420	"Mau"
Milho	Socavão	436	0,258	0,921	0,769	0,708	"Bom"
Milho	Ponta Grossa	249	0,767	0,980	0,974	0,954	"Ótimo"
Milho	Campos Gerais ⁽²⁾	427	0,187	0,877	0,914	0,802	"Muito Bom"
Soja e Milho	Campos Gerais ⁽³⁾	308	0,079	0,995	0,997	0,993	"Ótimo"

⁽¹⁾ Considerando todos os experimentos com a cultura da soja em Arapoti, Castro Itaberá e Ponta Grossa; ⁽²⁾ Considerando todos os experimentos com a cultura do milho em Arapoti, Castro Itaberá e Ponta Grossa; ⁽³⁾ Considerando todos os experimentos com as culturas da soja e milho em Arapoti, Castro Itaberá e Ponta Grossa. FONTE: A autora (2016)

Outro aspecto interessante a ser observado refere-se aos bons desempenhos obtidos das análises conjuntas de Yr vs Ys para região dos Campos Gerais, sendo: “ótimo” para a soja; “muito bom” para o milho; e, “ótimo” para as análises milho e soja.

Logo, o AquaCrop tem potencial para ser validado na região dos Campos Gerais para as culturas da soja e milho, com necessidade de calibração para atingir resultados mais confiáveis. O ajuste do modelo para condições específicas poderá aumentar significativamente sua eficiência. Acredita-se que os ajustes necessários a serem realizados tenham ligação com a disponibilidade de água para as plantas, de acordo com os atributos físico-hídricos do solo, já que os experimentos sobre Latossolos apresentaram erros pequenos, enquanto os demais solos apresentaram erros mais expressivos nas safras de alta ou baixa produtividade.

3.6 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos no presente estudo pôde-se concluir que:

- O *software* AquaCrop respondeu positivamente às expectativas quanto a simulação das produtividades de soja e milho na região dos Campos Gerais, tendo desempenhos predominantemente entre “muito bom” e “ótimo”.
- Os maiores erros de estimativa da produtividade de soja ocorreram nas safras que tiveram baixa produtividade real. O AquaCrop necessita de ajustes e calibração nos coeficientes que penalizam a produtividade potencial na região dos Campos Gerais, quando os fatores climáticos que afetam a produtividade são severos.
- O AquaCrop mostrou-se mais indicado para realizar simulações da produtividade de soja, em relação a de milho nas localidades analisadas dos Campos Gerais, devido aos dados utilizados.
- O tipo de solo interferiu nos resultados das análises do AquaCrop, sendo que os Latossolos apresentaram melhor desempenho e maiores correlações comparado aos demais solos estudados.

3.7 REFERÊNCIAS

- Abedinpour M, Sarangi A, Rajput TBS, Singh M, Pathak H, Ahmad T. Performance evaluation of aquacrop model for maize crop in semi-arid environment. *Agricultural water manegement*. 2012; 110:55-66.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper n.56*. Roma, FAO, 1998.
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM Sparovek G. Köppens's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. 2013; 22:711-728.
- Araujo MA, Souza JLM, Tsukahara RY. Modelos agro-meteorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum Agronomy*. 2011; 33: 23-31.
- Bernardon T, Calgaro M. Modelo de simulação do crescimento de plantas. *Ambiência*. 2007; 3:283-294.
- Camargo AP, Sentelhas PC. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 1997; 5:89-97.

Couto L, Costa EF, Viana RT. Efeito do veranico sobre a produção de cultivares de milho. In: Relatório técnico anual do centro nacional de pesquisa de milho e sorgo. Sete Lagoas, Embrapa-CNPMS, 1986.

Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 1997.

Embrapa, Embrapa Soja. Tecnologias de produção de soja na região central do Brasil. Minas Gerais: Uberaba, 2004.

Ferreira WPM, Costa LC, Souza CF. Modelo de estimativa da produtividade de soja {*Glicine max* (L.) merril} em função da variabilidade da temperatura. Engenharia na Agricultura. 2007; 15:400-407.

Geerts S, Raes D, Garcia M, Miranda R, Cusicanqui JA, Taboada C, Mendoza J, Huanca R, Mamani A, Condori O, Mamani J, Morales B, Osco V, Steduto P. Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. Agronomy Journal. 2009; 101:498-508.

Gregorich EG, Carter MR, Angers DA, Monreal CM, Ellert BH. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. Canadian Journal of Soil Science. 1994; 367-375.

Hsiao TC, Heng L, Steduto P, Rojas-Lara B, Raes D, Ferers E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parametrization and testing for maize. Agronomy Journal. 2009; 101:448-459.

Iqbal MA, Shen Y, Stricevic R, Pei H, Sun H, Amiri E, Penas A, Rio S. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. Agricultural Water Manegement. 2014; 135:61-72.

Magalhães PC. Fisiologia da produção de milho. Sete Lagoas, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2006.

Matzenauer R, Bergamaschi H, Berla TO, Riboldi J. Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. Pesquisa Agropecuária Gaúcha. 1995; 1:225-241.

Mello A, Caimi LL. Simulação na validação de sistemas computacionais para agricultura de precisão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2008; 12:666-675.

Mkhabela MS, Bullock PR. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. Agricultural Water Manegement. 2012; 110:16-24.

Paredes P, Wei Z, Liu Y, Xu D, Xin Y, Zhang B, Pereira LS. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. Agricultural Water Manegement. 2015; 152:57-71.

Pavan W, Fernandes JMC, Hölbig CA, Fraisse CW. Padrões de projeto aplicados a modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*. 2009; 1:15-29.

Pessoa, MCPY, Luchiari Júnior A, Fernandes EM, Lima MA. Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas. Jaguariúna, EMBRAPA-CNPMA, 1997.

Prevedello CL. Programa Splintex para estimar a curva de retenção de água a partir da granulometria (composição) do solo. Versão 1.0. Curitiba: UFPR, 1999.

Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: chapter 1. Roma, FAO, 2009.

Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop 4.0 – The FAO crop model to simulate yield response to water: chapter 3. Roma, FAO, 2012.

Sentelhas PC, Faria RT, Chaves MO, Hoogenboom G. Avaliação dos geradores de dados meteorológicos WGEN e SIMMETEO, nas condições tropicais e subtropicais brasileiras, usando modelos de simulação de culturas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 2001; 9:357-376.

Souza JLM, Gerstemberger E, Araujo MA. Calibração de modelos agrometeorológicos para estimar a produtividade da cultura do trigo, considerando sistemas de manejo do solo, em Ponta Grossa-PR. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 2013; 28:409-418.

Steduto P, Raes D, Hsiao TC, Fereres E, Hen L, Izzi G, Hoogeveen J. AquaCrop: A new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes*. 2008; 80:285-292.

Steduto P, Hsiao TC, Raes D, Fereres E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 2009; 101:426-437.

Tojo-Soler C, Folegatti MV, Faria RT. Uso do modelo CERES-Maize para identificação de características genéticas desejáveis e de práticas adequadas de manejo em milho “safrinha” e determinação de práticas adequadas de manejo em condições de risco climático. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 2001; 9:339-346.

Whisler FD, Acock B, Baker DN, Fye RE, Hodges HF, Lambert JR, Lemmon HE, Mckinion JM, Reddy VR. Crop simulation models in agronomic systems. *Advanced Agronomy*. 1986; 40:141-208.

Willmott CJ. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorology Society*. 1982; 63:1309-1313.

4 CAPÍTULO III – ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DA SOJA E MILHO CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS

4.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho verificar a influência dos atributos físico-hídricos do solo no desempenho do modelo AquaCrop, para estimar a produtividade das culturas da soja e milho na região dos Campos Gerais. A série de dados e valores de produtividade real utilizados nas análises foram obtidos de experimentos previamente realizados nas Estações Experimentais da Fundação ABC – Pesquisa e Desenvolvimento Agropecuário, dos anos safra de 2006 a 2014. Foram realizadas 64 simulações de produtividade da cultura da soja em Arapoti-PR, Castro-PR, Ponta Grossa-PR e Itaberá-SP, e 42 simulações para cultura do milho, em Castro-PR, Ponta Grossa-PR e distrito de Socavão-PR. Foram testados dois tipos de cenários nas simulações: (i) entrada de todos os atributos físico-hídricos do solo necessários no AquaCrop (simulação “completa”); e, (ii) entrada de apenas a classificação textural na área de “solos” do *software* (simulação “parcial”). As 104 produtividades reais e simuladas (“completa” e “parcial”) foram ajustadas em análises de regressão linear simples, e índices “*d*” de concordância e “*c*” de desempenho. Os resultados indicaram que a simulação “completa” no AquaCrop proporcionou resultados promissores, tendo desempenhos entre “muito bom” a “ótimo” para cultura da soja e entre “mau” a “ótimo” para a cultura do milho. A simulação “parcial” no AquaCrop proporcionou resultados bem variáveis, tendo desempenhos entre “péssimo” a “ótimo” para cultura da soja e entre “péssimo” a “mediano” para a cultura do milho. Logo, a simulação “parcial” deve ser utilizada com muita restrição. Utilizar a textura do solo para prever os valores de atributos físico-hídrico do solo indicou um caminho facilitador, mas baixo desempenho para estimar as produtividades das culturas da soja e milho nos Campos Gerais.

Palavras chave: AquaCrop, simulação, cultivo agrícola, atributos do solo, rendimento.

4.2 ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the influence of soil water-physical properties about the performance AquaCrop model to estimate the yield of soybean and corn crop in the Campos Gerais region. The data series of climate, soil, crop and management parameters of soybean and corn crops were obtained from previously experiments conducted at two experimental stations of ABC Foundation - Research and Agricultural Development, between 2006 and 2014. Were carried out 64 of the soybean yield simulations in Arapoti-PR, Castro-PR, Ponta Grossa-PR and Itaberá-SP, and 42 simulations for corn in Castro-PR, Ponta Grossa-PR and Socavão-PR. The simulations were performed by two different scenarios: (i) input of all soil water-physical properties needed in AquaCrop model ("full" simulation); and (ii) only input of soil textural classification ("partial" simulation). The 104 actual and simulated yields ("full" and "partial") were adjusted by linear regression analysis, and "d" index of agreement and "c" index of performance. The "full" simulation in AquaCrop provided promising crop yield estimations, with performances from "very good" to "great" for soybean and between "bad" to "good" for corn. The AquaCrop "partial" simulation provided performances from "bad" to "good" for soybean and between "very poor" to "average" for corn. Thus, the "partial" simulation should be used with great restraint. The sole use of the soil texture to predict soil water-physical properties and simulate the crop yield in AquaCrop, was considered as a facilitating way, but was appointed by underperforming the crop yield estimatives in Campos Gerais region.

Keywords: AquaCrop, simulation, crop, soil properties.

4.3 INTRODUÇÃO

Os sistemas computacionais têm se mostrado importantes ferramentas na agricultura. Dentre os *softwares* que trouxeram grandes vantagens à produção agrícola estão os modelos matemáticos de simulação de produção. Porém, a literatura afirma que países menos tecnificados tardam em aderir tais tecnologias, devido à falta de instrução de produtores e técnicos da área agrônômica (Whisler et al., 1986; Pessoa et al., 1997; Bernardon & Calgaro, 2007).

Uma das dificuldades no uso de modelos de simulação agrícola consiste no levantamento ou disponibilidade de dados de entrada. Alguns modelos exigem grande quantidade de dados de entrada, que podem, inclusive, serem de difícil obtenção e custo elevado. Considera-se que a evolução dos modelos de simulação caminha no sentido de aumento de precisão aliado à simplificação e robustez dos programas (Pessoa et al., 1997; Steduto et al., 2008; Steduto et al., 2009).

Com o objetivo de atender à demanda por modelos mais amplamente utilizáveis, pesquisadores vinculados à FAO (*Food and Agriculture Organisation*) desenvolveram o *software* AquaCrop. Dentre outras vantagens, o programa exige menor quantidade de dados de entrada e, ainda, a inserção de dados de mais fácil obtenção. O programa possui estrutura que permite a entrada de dados do clima, solo, cultura e manejo (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009).

No entanto, a literatura considera que as análises para obtenção dos valores dos atributos físico-hídricos do solo ainda utilizam métodos difíceis e demorados (Lin et al., 1999). As metodologias padrões exigem equipamento sensíveis e de alto custo, que não condizem com a estrutura da maioria dos laboratórios no Brasil. Além disso, os resultados muitas vezes apresentam erros e não são confiáveis (Oliveira et al., 2002). Logo, o levantamento dos atributos físico-hídricos para a inserção dos dados em modelos pode não apresentar tanta facilidade de obtenção, nem se mostrar operacional.

Para contornar o problema, o AquaCrop associa valores aos atributos físico-hídricos do solo, a partir de sua classificação textural, utilizando funções de pedotransferência (TABELA 4.1). No entanto, é possível introduzir no modelo valores de umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), ponto de

murcha permanente (θ_{PMP} , $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), saturação (θ_{sat} , $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e condutividade hidráulica saturada (K_{sat} , mm dia^{-1}) (Raes et al., 2012).

TABELA 4.1 – ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS PADRÕES, CONFORME CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL PARA SOLOS FRANCO ARGILO-ARENOSOS, ARGILO-ARENOSOS E ARGILOSOS.

Classificação textural	θ_{sat} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	θ_{CC} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	θ_{PMP} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	K_{sat} (mm dia^{-1})
Franco argilo-arenoso	0,52	0,44	0,23	120
Argilo-arenoso	0,50	0,39	0,27	75
Argiloso	0,55	0,54	0,39	2

FONTE: Adaptado de Raes et al. (2009).

Tendo em vista as dificuldades para se determinar alguns dados do solo que são necessários como entrada em alguns modelos de simulação, teve-se por objetivo no presente trabalho verificar a influência dos atributos físico-hídricos do solo no desempenho do modelo AquaCrop, para estimar a produtividade das culturas da soja e milho na região dos Campos Gerais.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Descrição das áreas experimentais

O presente trabalho foi realizado considerando a região dos Campos Gerais-PR, escolhida por ser referência na produção de grãos e onde se localiza a “Fundação ABC – Pesquisa e Desenvolvimento Agropecuário”, importante centro de pesquisa agropecuária, que viabilizou a realização das análises necessárias disponibilizando dados históricos de cultivos da soja e milho (safras 2006/07 a 2013/14). As Estações Experimentais utilizadas estão localizadas nos municípios de Arapoti, Castro, Ponta Grossa e distrito de Socavão, pertencentes ao Estado do Paraná e, o município de Itaberá, pertencente ao Estado de São Paulo. Foram utilizados dados observados nas parcelas experimentais do Setor de Agrometeorologia. Em todas as parcelas o relevo é plano a suave ondulado. O sistema de preparo do solo é o plantio direto com cobertura morta vegetal homogênea. Utiliza-se o sistema de rotação de culturas, alternado entre soja e milho no verão, e trigo e aveia preta no inverno.

A classificação de solo foi obtida a partir dos mapas de solos fornecidos pela Fundação ABC, com escala 1:10.000 (TABELA 4.2). Os tipos climáticos foram identificados em Álvares et al. (2013), que utilizou a classificação climática de

Köppen para essa finalidade. A localização, coordenadas geográficas e altitude foram mensurados com aparelho de GPS.

TABELA 4.2 – CARACTERIZAÇÃO QUANTO À LOCALIZAÇÃO, SOLO, CLIMA, COORDENADAS GEOGRÁFICAS E ALTITUDES DAS ESTAÇÕES EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC.

Município	Estado	Solo	Clima ⁽¹⁾	Latitude ----- (graus) -----	Longitude ----- (graus) -----	Altitude (m)
Arapoti	Paraná	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	Cfa/Cfb ⁽²⁾	24,18° S	49,85° W	902
Castro	Paraná	CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Cfb	24,85° S	49,93° W	1001
Itaberá	São Paulo	PLANOSSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Cfa	24,07° S	49,15° W	735
Ponta Grossa	Paraná	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	Cfb	25,01° S	50,15° W	1000
Socavão	Paraná	ORGANOSSOLO MÉSICO Sáprico típico	Cfb	24,68° S	49,75° W	1026

⁽¹⁾ Adaptado de Álvares et al. (2013); ⁽²⁾ Local de transição climática. FONTE: A autora (2016)

4.4.2 Cenários e dados de entrada necessários nas simulações do AquaCrop

Para verificar o desempenho do modelo AquaCrop em condições de produção agrícola, foram realizadas 42 e 64 simulações da produção da cultura do milho e soja (kg ha^{-1}), respectivamente, para posterior comparação com as produtividades reais (kg ha^{-1}) de experimentos previamente realizados a campo, nas safras 2006/07 a 2013/14. Para iniciar a simulação o modelo AquaCrop necessita de dados de entrada referentes ao clima, cultura, solo e manejo (Raes et al., 2009).

Os dados de entrada referentes ao clima, cultura e manejo variaram conforme as Estações Experimentais. Referente aos dados de entrada dos solos foram testados dois cenários nas simulações das produtividades das culturas da soja e milho:

- Cenário simulação “completa”: Teve-se a entrada de todos os atributos físico-hídricos do solo, respectivo a cada Estação Experimental analisada, necessários no AquaCrop;
- Cenário simulação “parcial”: Teve-se a entrada de apenas a classificação textural da respectiva Estação Experimental, no formulário “solos” do *software* AquaCrop (TABELA 4.1).

Considerações e aspectos metodológicos sobre os dados de clima, cultura, manejo e solo utilizado como entrada no AquaCrop:

a) Solo: As espessuras de solo estudadas foram 0,0-0,10 m; 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m. Para cada espessura, foram inseridos no modelo dados conforme cenários simulações: “completa” ou “parcial”. Em ambos os cenários, a umidade do solo no momento do plantio foi estimada preliminarmente em planilha eletrônica desenvolvida para esta finalidade, conforme Souza et al. (2013):

– “Completa”: condutividade hidráulica saturada (K_{sat} , mm dia⁻¹); umidades volumétricas na saturação (θ_{sat} , m³ m⁻³), capacidade de campo (θ_{CC} , m³ m⁻³) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP} , m³ m⁻³). Os dados de solo foram obtidos a partir de amostras de solo coletadas nos campos experimentais da Fundação ABC. Para cada parcela experimental de 50 x 100 m, foram definidos cinco pontos experimentais representativos. Para cada ponto e espessura de solo estudada foi coletada uma amostra indeformada, totalizando 75 amostras de solo (5 Estações Experimentais, 5 pontos experimentais e 3 profundidades). As umidades volumétricas na saturação (m³ m⁻³) e capacidade de campo (m³ m⁻³) foram determinadas conforme Embrapa (1997), no Laboratório de Manejo de Bacias Hidrográficas da UFPR, utilizando amostras indeformadas de solo, coletadas com anéis volumétricos de 5 cm de diâmetro e 3 cm de altura. A umidade do solo na capacidade de campo (m³ m⁻³) foi determinada quando ocorreu equilíbrio da água na mesa de tensão, na tensão de 0,01 MPa. A umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (m³ m⁻³) foi estimada na curva de retenção de água no solo, gerada com o *software* de pedotransferência SPLINTEX (Prevedello, 1999). Considerou-se como ponto de murcha permanente a umidade volumétrica na tensão de 1,5 MPa. A condutividade hidráulica saturada (mm dia⁻¹) foi determinada em permeâmetro de carga constante, conforme Embrapa (1997), no Núcleo de Atividades de Engenharia em Biossistemas (NAEB) da UFPR.

– “Parcial”: Entrou-se apenas com a classificação textural no AquaCrop. A textura do solo foi determinada com amostras deformadas de solo, utilizando o método do densímetro, conforme a metodologia da Embrapa (1997), no Laboratório de Física do Solo da UFPR. Assim, todos os atributos físico-hídricos, como condutividade hidráulica saturada (mm dia⁻¹); umidades volumétricas na saturação (m³ m⁻³),

capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) foram estimados internamente, conforme metodologia do próprio AquaCrop (Raes et al., 2009);

b) Clima: Os dados climáticos utilizados foram provenientes das estações agrometeorológicas anexas à cada Estação Experimental. Os dados de temperaturas mínimas e máximas do ar ($^{\circ}\text{C}$) e precipitação pluvial (mm dia^{-1}) foram obtidos dos bancos de dados climáticos fornecidos pelo Setor de Agrometeorologia da Fundação ABC. A evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}) foi estimada com o método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). A concentração média anual de CO_2 na atmosfera (ppm) já se encontra disponível no AquaCrop, tendo dados provenientes medidos no observatório de Mauna Loa, Havaí (Raes et al., 2009);

c) Cultura: As variáveis de entrada inseridas no modelo, referentes às culturas do milho e soja, foram a data do plantio, duração de cada ciclo fenológico (dia), população de plantas (plantas ha^{-1}) e comprimento médio efetivo das raízes (cm). Os dados foram provenientes de séries históricas de experimentos realizados nas Estações Experimentais da Fundação ABC, nas safras de 2006/07 a 2013/14;

d) Manejo: O AquaCrop permite a inserção de variáveis como a presença e tipo de cobertura do solo (%), utilização e tipo de irrigação, frequência de irrigação (dias), volume de irrigação (mm) e qualidade da água de irrigação. O modelo também considera a possibilidade de quatro níveis de fertilização (alto, próximo ao ideal, médio e baixo). Além disso, há possibilidade de detalhamento da fertilização, sendo possível inserir ou testar as doses de cada nutriente separadamente (Raes et al., 2009). No entanto, no presente estudo a irrigação não foi considerada e o nível de fertilização foi considerado próximo ao ideal. Por se tratar de áreas em sistema de plantio direto, a cobertura do solo foi considerada fixa em 50%, em todas as Estações Experimentais.

Os dados de entrada descritos anteriormente foram inseridos no AquaCrop formando um banco de dados de solo e clima para cada campo experimental, nas safras entre 2006 e 2014. Os dados referentes ao manejo foram iguais para todas as simulações, assim houve a necessidade de se alterar apenas os dados referentes à cultura nas simulações.

4.4.3 Análises estatísticas

Os respectivos valores de produtividades reais (kg ha^{-1}) e estimadas (kg ha^{-1}), obtidos nas simulações “completa” ou “parcial”, foram comparadas estatisticamente, considerando: análise de regressão linear, coeficiente de correlação, índices “ d ” (Willmott, 1982) e “ c ” (Camargo e Sentelhas, 1997). Os resultados das análises foram organizados por município.

– Cálculo do coeficiente de correlação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(Y_{r_i} - \bar{Y}_r) \cdot (Y_{s_i} - \bar{Y}_s)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{r_i} - \bar{Y}_r)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_{s_i} - \bar{Y}_s)^2}}$$

– Cálculo do Índice “ d ” de Willmott (1982):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{s_i} - Y_{r_i})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (|Y_{s_i} - \bar{Y}_r| + |Y_{r_i} - \bar{Y}_r|)^2}}$$

– Cálculo do índice “ c ” de Camargo e Sentelhas (1997):

$$c = d \cdot r$$

Sendo: r – coeficiente de correlação (adimensional); d – índice “ d ” Willmott (adimensional); c – índice “ c ” de Camargo e Sentelhas (adimensional); Y_{r_i} – valores reais de produtividade observados no i -ésimo experimento (kg ha^{-1}); Y_{s_i} – valores simulados de produtividade no i -ésimo experimento (kg ha^{-1}); \bar{Y}_r – média dos valores reais de produtividade observados nos i -ésimos experimentos (kg ha^{-1}); \bar{Y}_s – média dos valores simulados de produtividade nos i -ésimos experimentos (kg ha^{-1}); n – número de experimentos no município (adimensional).

Os valores do índice “ c ” indicam o seguinte desempenho do modelo testado: “ótimo” (“ c ” > 0,85); “muito bom” ($0,76 \leq “c” \leq 0,85$); bom ($0,66 \leq “c” \leq 0,75$); “mediano” ($0,61 \leq “c” \leq 0,65$); “sofrível” ($0,51 \leq “c” \leq 0,60$); “mau” ($0,41 \leq “c” \leq 0,50$); e, “péssimo” (“ c ” ≤ 0,40).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Considerações sobre os atributos físico-hídricos “medidos” e “padrão”

Os valores “medidos” dos atributos físico-hídricos dos solos para algumas Estações Experimentais foram diferentes ou próximos dos considerados “padrão” por Raes et al. (2009), conforme classificação textural de cada solo (TABELA 4.3).

Os valores de θ_{sat} “medidos” em Arapoti foram menores que os valores “padrão”; em Castro e Socavão foram maiores; e, em Itaberá e Ponta Grossa foram bem semelhantes. Os valores de θ_{sat} (considerado igual à porosidade total do solo) e θ_{CC} permitem calcular a porosidade livre de água “ $\beta = \theta_{sat} - \theta_{CC}$ ”, que consiste no espaço poroso não ocupado por água. A literatura indica que a β deve ser suficiente para que a difusão de oxigênio no solo supra a demanda de oxigênio das culturas agrícolas em pleno desenvolvimento (Erickson, 1982; Reichardt & Timm, 2004). Assim, valores de β são mais importantes do que a magnitude (menor ou maior) dos valores de θ_{sat} e θ_{CC} . Estudos indicam que a β deve ser de, no mínimo, 0,1 m³ m⁻³ ou 10% (Erickson, 1982; Reichardt & Timm, 2004).

De forma geral, os valores de β calculados com os dados “medidos” indicaram melhores condições de aeração para as culturas da soja e milho do que os valores “padrão”, sendo verificadas médias de: $\beta = 17\%$ (“medido”) e $\beta = 8\%$ (“padrão”) para o solo Franco argilo-arenoso de Arapoti; $\beta = 15\%$ (“medido”) e $\beta = 11\%$ (“padrão”) para o solo Argilo-arenoso de Ponta Grossa; $\beta = 15,9\%$ (“medido”) e $\beta = 1,0\%$ (“padrão”) para os solos Argiloso e Muito Argiloso localizados em Castro, Itaberá e Socavão; e, $\beta = 15,9\%$ (“medido”) e $\beta = 4,4\%$ (“padrão”) para todos os solos analisados da região dos Campos Gerais (Franco argilo-arenoso, Argilo-arenoso, Argiloso e Muito Argiloso).

Logo, desde que considerado no processo de cálculo, os valores de β (“padrão”) podem penalizar as produtividades estimadas no AquaCrop, apresentando maiores erros em relação aos valores de produtividade real ou estimada com os parâmetros físico-hídricos “medidos”.

Os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} “medidos” foram menores em relação aos valores “padrão”, com exceção do solo Argilo-arenoso (0-10 cm) da Estação Experimental em Ponta Grossa, em que a θ_{CC} foi igual ao valor “padrão”.

TABELA 4.3 – CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL E PARÂMETROS FÍSICO-HÍDRICOS “PADRÃO” E “MEDIDOS” DOS SOLOS DAS PARCELAS EXPERIMENTAIS DA FUNDAÇÃO ABC, NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS, E DIFERENÇA ENTRE VALORES “MEDIDOS” E “PADRÃO” (Δ).

Local	Camada (m)	Classificação textural	θ_{sat}	$\theta_{sat}^{(1)}$	$\Delta\theta_{sat}$	θ_{PMP}	$\theta_{PMP}^{(1)}$	$\Delta\theta_{PMP}$	θ_{CC}	$\theta_{CC}^{(1)}$	$\Delta\theta_{CC}$	K_{sat}	$K_{sat}^{(1)}$	ΔK_{sat}	$\theta_{dis} = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$	$\theta_{dis}^{(1)} = \theta_{CC}^{(1)} - \theta_{PMP}^{(1)}$	$\Delta\theta_{dis}$
			----- (m ³ m ⁻³) -----									----- (m ³ m ⁻³) -----			----- (mm dia ⁻¹) -----		
Arapoti	0,0-0,10	Franco argilo-arenoso	0,49	0,52	-0,03	0,15	0,23	-0,08	0,34	0,44	-0,10	1394,9	120	1275	0,19	0,21	-0,02
Arapoti	0,10-0,25	Franco argilo-arenoso	0,47	0,52	-0,05	0,15	0,23	-0,08	0,3	0,44	-0,14	1268,4	120	1148	0,15	0,21	-0,06
Arapoti	0,25-0,40	Franco argilo-arenoso	0,49	0,52	-0,03	0,16	0,23	-0,07	0,3	0,44	-0,14	1124,5	120	1005	0,14	0,21	-0,07
Castro	0,0-0,10	Argiloso	0,63	0,55	0,08	0,36	0,39	-0,03	0,5	0,54	-0,04	418,3	2	416,3	0,14	0,15	-0,01
Castro	0,10-0,25	Argiloso	0,6	0,55	0,05	0,33	0,39	-0,06	0,47	0,54	-0,07	368,2	2	366,2	0,14	0,15	-0,01
Castro	0,25-0,40	Muito argiloso	0,62	0,55	0,07	0,32	0,39	-0,07	0,45	0,54	-0,09	325,7	2	323,7	0,13	0,15	-0,02
Itaberá	0,0-0,10	Argiloso	0,55	0,55	0	0,28	0,39	-0,11	0,4	0,54	-0,14	516,5	2	514,5	0,12	0,15	-0,03
Itaberá	0,10-0,25	Argiloso	0,54	0,55	-0,01	0,24	0,39	-0,15	0,37	0,54	-0,17	462,3	2	460,3	0,13	0,15	-0,02
Itaberá	0,25-0,40	Argiloso	0,54	0,55	-0,01	0,22	0,39	-0,17	0,37	0,54	-0,17	420,4	2	418,4	0,15	0,15	0,00
Ponta Grossa	0,0-0,10	Argilo-arenoso	0,51	0,5	0,01	0,2	0,27	-0,07	0,39	0,39	0	743,3	75	668,3	0,19	0,12	0,07
Ponta Grossa	0,10-0,25	Argilo-arenoso	0,5	0,5	0	0,2	0,27	-0,07	0,35	0,39	-0,04	732,6	75	657,6	0,15	0,12	0,03
Ponta Grossa	0,25-0,40	Argilo-arenoso	0,54	0,5	0,04	0,25	0,27	-0,02	0,36	0,39	-0,03	636,3	75	561,3	0,11	0,12	-0,01
Socavão	0,0-0,10	Argiloso	0,57	0,55	0,02	0,28	0,39	-0,11	0,43	0,54	-0,11	336	2	334	0,15	0,15	0,00
Socavão	0,10-0,25	Muito argiloso	0,59	0,55	0,04	0,27	0,39	-0,12	0,41	0,54	-0,13	351,1	2	349,1	0,14	0,15	-0,01
Socavão	0,25-0,40	Muito argiloso	0,59	0,55	0,04	0,24	0,39	-0,15	0,4	0,54	-0,14	355,5	2	353,5	0,16	0,15	0,01

⁽¹⁾ Atributos físico-hídricos “padrão”, conforme classificação textural para solos franco argilo-arenosos, argilo-arenosos e argilosos, adaptado de Raes et al. (2009). Fonte: A autora (2016)

É importante considerar que os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} “medidos” e “padrão” apresentaram diferenças. No entanto, os valores de água disponível no solo ($\theta_{dis} = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$) obtidos para os valores “medidos” e “padrão” foram bem próximos, tendo média: $\theta_{dis} = 0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (“medido”) e $\theta_{dis} = 0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (“padrão”) para o solo Franco argilo-arenoso de Arapoti; $\theta_{dis} = 0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (“medido”) e $\theta_{dis} = 0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (“padrão”) para o solo Argilo-arenoso de Pontos Grossa; $\theta_{dis} = 0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (“medido”) e $\theta_{dis} = 0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (“padrão”) para os solos Argiloso e Muito Argiloso localizados em Castro, Itaberá e Socavão; e, $\theta_{dis} = 0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (“medido”) e $\theta_{dis} = 0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (“padrão”) para todos os solos analisados da região dos Campos Gerais (Franco argilo-arenoso, Argilo-arenoso, Argiloso e Muito Argiloso). Logo, é importante observar que em termos de capacidade de água disponível no solo, os valores θ_{CC} e θ_{PMP} “medido” e “padrão” não apresentaram diferenças nas simulações.

Considerando os valores de água disponível ($\theta_{dis} = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$) e profundidade do sistema radicular z (0-10 cm, 10-25 cm e 25-40 cm), respectivo de cada camada, os cálculos da capacidade de água disponível ($CAD = \theta_{dis} \cdot z$) até $z = 40$ cm, com os atributos físicos “medidos” e “padrão”, indicaram os seguintes valores: $CAD = 62,5 \text{ mm}$ (“medido”) e $CAD = 84,0 \text{ mm}$ (“padrão”) para o solo Franco argilo-arenoso de Arapoti; $CAD = 54,5 \text{ mm}$ (“medido”) e $CAD = 60,0 \text{ mm}$ (“padrão”) para os solos Argiloso e Muito Argilo de Castro; $CAD = 54,0 \text{ mm}$ (“medido”) e $CAD = 60,0 \text{ mm}$ (“padrão”) para o solo Argiloso de Itaberá; $CAD = 58,0 \text{ mm}$ (“medido”) e $CAD = 48,0 \text{ mm}$ (“padrão”) para o solo Argilo-arenoso de Pontos Grossa; $CAD = 60,0 \text{ mm}$ (“medido”) e $CAD = 60,0 \text{ mm}$ (“padrão”) para os solos Argiloso e Muito argiloso de Socavão; e, média de $CAD = 57,8 \text{ mm}$ (“medido”) e $CAD = 62,4 \text{ mm}$ (“padrão”) para todos os solos analisados da região dos Campos Gerais (Franco argilo-arenoso, Argilo-arenoso, Argiloso e Muito Argiloso). Logo, a ocorrência de deficiência hídrica nas simulações é pouco provável na região dos Campos Gerais. Em estudo na região de Ponta Grossa, Scheraiber (2012) verificou que a probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica (mm decêndio^{-1}) é praticamente nula em simulações de balanços hídricos, para solos contendo $CAD = 60 \text{ mm}$, fração de água disponível (p) entre 0,3 e 0,7 e culturas com coeficiente de cultivo (kc) entre 0,75 a 1,1. Desta forma, acredita-se que os valores de armazenamento ao longo das safras, nas simulações, não serão responsáveis por prováveis diferenças que

possam ocorrer entre valores de produtividades estimadas com os atributos físico-hídricos “medidos” e “padrão”.

Os valores de K_{sat} “medidos” foram bem maiores que os valores “padrão” para todas as classificações texturais estudadas. Logo, os solos estudados possuem característica de drenagem (τ) diferente do “padrão”. Segundo Raes et al. (2012), a característica de drenagem é uma constante adimensional responsável pelo formato conferido à curva potencial de esgotamento de água de uma camada de solo. A drenagem (τ) é uma constante que depende da condutividade hidráulica saturada. Assim, o uso dos atributos “padrão” considera que o esgotamento de água de uma camada de solo ocorreria de forma mais lenta que os atributos “medidos”.

Os valores K_{sat} “medidos” e “padrão” tiveram as seguintes médias: $K_{sat} = 1263$ mm dia⁻¹ (“medido”) e $K_{sat} = 120$ mm dia⁻¹ (“padrão”) para o solo Franco argilo-arenoso de Arapoti; $K_{sat} = 704$ mm dia⁻¹ (“medido”) e $K_{sat} = 75$ mm dia⁻¹ (“padrão”) para o solo Argilo-arenoso de Ponta Grossa; $K_{sat} = 395$ mm dia⁻¹ (“medido”) e $K_{sat} = 2$ mm dia⁻¹ (“padrão”) para os solos Argiloso e Muito Argiloso em Castro, Itaberá e Socavão; e, $K_{sat} = 630$ mm dia⁻¹ (“medido”) e $K_{sat} = 40$ mm dia⁻¹ (“padrão”) para todos os solos analisados da região dos Campos Gerais (Franco argilo-arenoso, Argilo-arenoso, Argiloso e Muito Argiloso).

4.5.2 Desempenho das estimativas de produtividade com o AquaCrop

Os coeficientes de correlação indicaram que a associação entre as produtividades reais e estimadas (Y_r vs Y_s) no AquaCrop é menos estreita quando se utiliza o cenário “parcial”, com atributos físico-hídricos do solo “padrão” nas simulações (TABELA 4.4 e FIGURA 4.1). Nas simulações com o cenário “completa” obteve-se $r \geq 0,88$ para soja (Castro) e $r \geq 0,81$ para o milho (Castro). Nas simulações no cenário “parcial”, os valores de r foram menores, mas a menor associação ocorreu em Castro ($r = 0,41$; soja) e Socavão ($r = 0,56$; milho). Analisando-se os atributos físico-hídricos (TABELA 4.3), aparentemente não foi possível identificar o motivo. Castro e Socavão têm solo Argiloso e Muito argiloso, o que limitou a porosidade de aeração (β) a 1% e $K_{sat} = 2$ mm dia⁻¹. Esses valores de atributos poderiam ter interferido no resultado da estimativa da produtividade no

AquaCrop, mas Itaberá também possui os mesmos valores de β e K_{sat} e não apresentou redução da r .

Os valores de r da associação " Y_r vs Y_s " foram menores nas simulações "parcial". Contudo, a queda dos desempenhos deveu-se principalmente aos valores do índice " d " (TABELA 4.4). A utilização dos atributos físico-hídricos "padrão", baseando-se apenas na classe textural dos solos, de alguma forma alterou os valores de produtividade simulada (Y_s) e a dispersão dos dados distanciou da reta de 45° (FIGURA 4.1). Castro e Socavão novamente foram as localidades que tiveram maior redução nos valores de índice " d ". As análises conjuntas " Y_r vs Y_s " para os Campos Gerais, considerando as culturas do "milho" e "soja e milho" também chamaram a atenção pela redução nos valores de índice " d ".

Logo, os desempenhos das estimativas de produtividade das culturas da soja e milho com o AquaCrop, utilizando os dados de entrada "parcial", ficaram entre "sofrível" e "muito bom", com predomínio para "péssimo" (TABELA 4.4). Apenas Ponta Grossa ("ótimo") e Itaberá ("muito bom"), para a cultura da soja, apresentaram desempenhos satisfatórios. Com exceção de Ponta Grossa, todos os desempenhos obtidos no AquaCrop nas simulações cenário "parcial" foram inferiores aos obtidos nas simulações cenário "completa".

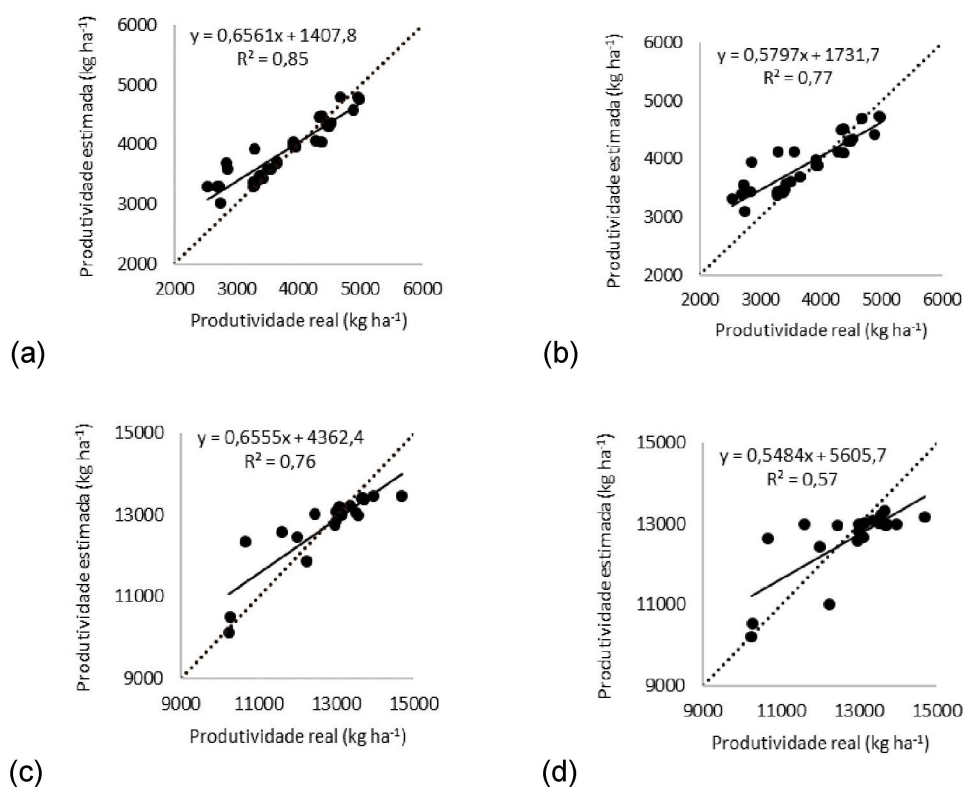
Assim, o cenário "parcial" no AquaCrop deve ser utilizado com muita restrição. Utilizar a textura do solo para prever os valores de atributos físico-hídrico do solo indicou um caminho facilitador, mas com baixo desempenho para estimar as produtividades das culturas da soja e milho nos Campos Gerais. Os resultados positivos para a cultura da soja em Ponta Grossa ("ótimo") e Itaberá ("muito bom") foram insuficientes, pois não permitiram identificar a relação de causa e efeito com os valores de atributos físico-hídricos medidos.

TABELA 4.4 – DESEMPENHO DO MODELO AQUACROP, CONFORME OS CENÁRIOS DE SIMULAÇÕES “COMPLETA” E “PARCIAL”, PARA AS CULTURAS DA SOJA E MILHO NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

Cultura	Local	Simulação “completa”				Simulação “parcial”			
		<i>r</i>	“d”	“c”	Desempenho	<i>r</i>	“d”	“c”	Desempenho
Soja	Arapoti	0,94	0,87	0,82	"Muito bom"	0,84	0,69	0,58	"Sofrível"
Soja	Castro	0,88	0,86	0,76	"Muito bom"	0,41	0,59	0,24	"Péssimo"
Soja	Itaberá	0,91	0,84	0,77	"Muito bom"	0,94	0,89	0,83	"Muito bom"
Soja	Ponta Grossa	0,99	0,99	0,98	"Ótimo"	0,97	0,94	0,92	"Ótimo"
Soja	Campos Gerais ⁽¹⁾	0,93	0,89	0,83	"Muito bom"	0,85	0,80	0,68	"Bom"
Milho	Castro	0,81	0,52	0,42	"Mau"	0,77	0,46	0,36	"Péssimo"
Milho	Socavão	0,92	0,77	0,71	"Bom"	0,56	0,44	0,25	"Péssimo"
Milho	Ponta Grossa	0,98	0,97	0,95	"Ótimo"	0,92	0,69	0,63	"Mediano"
Milho	Campos Gerais ⁽²⁾	0,88	0,79	0,69	"Bom"	0,76	0,49	0,37	"Péssimo"
Soja e Milho	Campos Gerais ⁽³⁾	1,00	0,84	0,84	"Muito bom"	0,99	0,66	0,65	"Mediano"

⁽¹⁾ Considerando os experimentos com a cultura da soja em Arapoti, Castro Itaberá e Ponta Grossa; ⁽²⁾ Considerando os experimentos com a cultura do milho em Castro, Socavão e Ponta Grossa; ⁽³⁾ Considerando todos os experimentos com as culturas da soja e milho em Arapoti, Castro, Itaberá e Ponta Grossa e Socavão. FONTE: a autora (2016)

FIGURA 4.1 – ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ENTRE A PRODUTIVIDADE MÉDIA REAL E ESTIMADA COM O AQUACROP, NA REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS. EM SIMULAÇÕES: a) “COMPLETA”, ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO “MEDIDOS” PARA A SOJA; b) “PARCIAL”, ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO “PADRÃO” PARA A SOJA; c) “COMPLETA”, ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO “MEDIDOS” PARA O MILHO; E, d) CENÁRIO “PARCIAL”, ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO “PADRÃO” PARA O MILHO.



FONTE: A autora (2016).

4.6 CONCLUSÕES

O cenário de simulação “completa” no AquaCrop proporcionou resultados promissores, tendo desempenhos entre “muito bom” a “ótimo” para cultura da soja e entre “mau” a “ótimo” para a cultura do milho, na região dos Campos Gerais.

O cenário de simulação “parcial” no AquaCrop proporcionou resultados variáveis, tendo desempenhos entre “péssimo” a “ótimo” para cultura da soja e entre “péssimo” a “mediano” para a cultura do milho, na região dos Campos Gerais.

O cenário de simulação “parcial” no AquaCrop deve ser utilizado com muita restrição. Utilizar a textura do solo para predizer os valores de atributos físico-hídrico do solo indicou um caminho facilitador, mas baixo desempenho para estimar as produtividades das culturas da soja e milho nos Campos Gerais.

4.7 REFERÊNCIAS

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper n.56. Roma, FAO, 1998.
- Álvares CA, Stape, JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G. Köppens's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift. 2013; 22:711-728.
- Bernardon T, Calgaro M. Modelo de simulação do crescimento de plantas. *Ambiência*. 2007;3:283-294.
- Camargo AP, Sentelhas PC. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 1997; 5:89-97.
- Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro, 1997.
- Erickson AE. Tillage effects on soil aeration. In: Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. American Society of Agronomy. 1982; 1:91-104.
- Gubiani, PI, Reinert DJ, Reichert JM. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. *Ciência Rural*, 2006, 36:664-668.
- Lin HS, McInnes KJ, Wilding LP, Hallmark CT. Effects of soil morphology on hydraulic properties II: Hydraulic pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal*. 1999; 63:955-961.
- Oliveira LB, Ribeiro MR, Jacomine PKT, Rodrigues JJV, Marques FA. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em

solos do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*. 2002; 26:315-323.

Pessoa MCPY, Luchiari Júnior A, Fernandes EN, Lima MA. Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas. Jaguariúna, EMBRAPA-CNPMA, 1997.

Prevedello CL. Programa Splintex para estimar a curva de retenção de água a partir da granulometria (composição) do solo. Versão 1.0. Curitiba: UFPR, 1999.

Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: chapter 1. Roma, FAO, 2009.

Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop 4.0 – The FAO crop model to simulate yield response to water: chapter 3. Roma, FAO, 2012.

Reichardt K, Timm LC. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri, 2004.

Scheraiber CF. Adaptação metodológica para a estimativa e caracterização das relações hídricas como suporte ao planejamento agrícola [dissertação]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2012.

Souza JLM, Gerstemberger E, Araujo MA. Calibração de modelos agrometeorológicos para estimar a produtividade da cultura do trigo, considerando sistemas de manejo do solo, em Ponta Grossa-PR. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 2013; 28:409-418.

Steduto P, Hsiao TC, Raes D, Fereres E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 2009; 101:426-437.

Steduto P, Raes D, Hsiao TC, Fereres E, Hen L, Izzi G, Hoogeveen J. AquaCrop: A new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes*. 2008; 80:285-292.

Whisler FD, Acock B, Baker DN, Fye RE, Hodges HF, Lambert JR, Lemmon HE, Mckinion, JM, Reddy VR. Crop simulation models in agronomic systems. *Advanced Agronomy*. 1986; 40:141-208.

Willmott CJ. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorology Society*. 1982; 63:1309-1313.

5 CONCLUSÃO GERAL

De acordo com os atributos físico-hídricos dos solos estudados, o manejo adotado nos cultivos da região dos Campos Gerais não possui potencial de degradação dos solos e não indicam causar danos a sua capacidade produtiva. A textura dos solos estudados varia entre franco argilo-arenosa e muito argilosa. A média da massa específica do solo está compreendida entre limites considerados ideais aos solos para suas respectivas texturas. A média da porosidade total dos solos está compreendida na faixa próxima ao ideal para o desenvolvimento de culturas anuais sob sistema de plantio direto. A proporção entre micro e macroporos é predominantemente próxima a 3:1, sendo os microporos relativamente superior em alguns tipos de solos. As médias da condutividade hidráulica saturada dos solos indicam condição “moderada”. Os valores médios da capacidade de água disponível dos solos indicam baixa probabilidade de ocorrência de déficit hídrico para as culturas cultivadas na região (soja, milho, trigo e aveia).

O *software* AquaCrop respondeu positivamente às expectativas quanto a simulação das produtividades de soja e milho na região dos Campos Gerais, tendo desempenhos predominantemente entre “muito bom” e “ótimo”, sendo observada superioridade nos desempenhos de simulações para a cultura da soja, comparada ao milho. O AquaCrop necessita de ajustes e calibração nos coeficientes que penalizam a produtividade potencial quando os fatores climáticos que afetam a produtividade são mais severos. As simulações nos Latossolos apresentaram melhor desempenho e correlações mais estreitas comparada aos demais solos estudados.

Não é recomendado utilizar apenas a classificação textural da área no AquaCrop, para predizer os valores de atributos físico-hídrico do solo. O procedimento indicou um caminho facilitador, mas baixo desempenho para estimar as produtividades das culturas da soja e milho nos Campos Gerais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A demanda por dados tem se mostrado crescente e necessária no setor agrícola, tanto para finalidade de aumento de rendimento, quanto na pesquisa. A elaboração e disponibilização de bancos de dados pode ser uma alternativa interessante, principalmente referente à dados considerados de difícil obtenção, como os atributos físico-hídricos do solo.

A simulação das produtividades de soja e milho com o AquaCrop na região dos Campos Gerais deve ser mais estudada, no que se refere a sensibilidade dos parâmetros que penalizam a produção potencial. Desta forma, acredita-se na possibilidade de calibração e validação do modelo, para que seu uso possa ser feito com maior confiança.

A restrição ou utilização parcial dos atributos físico-hídricos do solo nas simulações com o AquaCrop na região dos Campos Gerais não se mostrou válida. A intensidade com que os atributos afetaram a produção deve ser mais profundamente estudada para que os ajustes necessários sejam indicados.

REFERÊNCIAS GERAIS

- Abedinpour M, Sarangi A, Rajput TBS, Singh M, Pathak H, Ahmad T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in semi-arid environment. *Agricultural Water Management*. 2012; 110:55-66.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper n.56. Roma, FAO, 1998.
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. 2013; 22:711-728.
- Andrade RS, Stone LF. Estimativa da umidade em capacidade de campo em solos sob Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2010; 15:111-116.
- Araujo MA, Souza JLM, Tsukahara RY. Modelos agro-meteorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum Agronomy*. 2011; 33: 23-31.
- Baier W. Crop-weather analysis model: review and model development. *Journal of Applied Meteorology*. 197; 12:937-947.
- Baver LD, Gardner WH, Gardner WR. Soil structure: classification and genesis. In: Baver LD, Gardner WH, Gardner WR. *Soil physics*. New York: 1972; p. 130-177.
- Bernardon T, Calgaro M. Modelo de simulação do crescimento de plantas. *Ambiência*. 2007; 3:283-294.
- Bognola IA, Dedecek RA, Lavoranti OJ, Higa AR. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. *Pesquisa Florestal Brasileira*. 2010; 30:37-49.
- Bouma, J. Measuring the conductivity of soil horizons with continuous macropores. *Soil Science Society of America Journal*. 1982; 46:438-441.
- Camargo AP, Sentelhas PC. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 1997; 5:89-97.
- Carter MR. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. *Soil and Tillage Research*. 1988; 12:37-51.
- Cassel DK, Nielsen DR. Field capacity and available water capacity. In: *Methods of soil analysis*, Madison: ASA – SSSA; 1986.p.901-926.
- Cavenage A, Moraes MLT, Alves MC, Carvalho MAC, Freitas MLM, Buzetti S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo vermelho-escuro sob diferentes culturas. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*. 1999; 23:997-1003.
- Costa WA, Oliveira CAS, KATO E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2008; 32:515-523.

Couto L, Costa EF, Viana RT. Efeito do veranico sobre a produção de cultivares de milho. In: Relatório técnico anual do centro nacional de pesquisa de milho e sorgo. Sete Lagoas, Embrapa-CNPMS, 1986.

Dexter AR, Youngs IM. Soil physic toward 2000. Soil and Tillage Reserarch. 1992; 24:101-106.

Dexter AR. Advancs in characterization of soil structure. Soil and Tillage Reserarch. 1988; 11:199-238.

Doorenbos J, Kassam AH. Yield response to water. Irrigation and Drainage. Roma: FAO; 1979. (Paper, 33).

Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro: 1997.

Embrapa, Embrapa Soja. Tecnologias de produção de soja na região central do Brasil. Minas Gerais: Uberaba, 2004.

Erickson AE. Tillage effects on soil aeration. American Society of Agronomy. 1982; 1:91-104.

Fabian AJ, Ottoni Filho TB. Determinação de capacidade de campo *in situ* ou através de equações de regressão. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 2000; 35:1029-1036.

Ferreira WPM, Costa LC, Souza CF. Modelo de estimativa da produtividade de soja {*Glicine max* (L.) merril} em função da variabilidade da temperatura. Engenharia na Agricultura. 2007; 15:400-407.

Fezer KF. Atributos físicos do solo e relações hídricas para cultura do *Pinus taeda* L. e mata nativa sobre Latossolo, em Telêmaco Borba-PR [dissertação]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2013.

Fundação ABC. Relatório anual 2015 [internet]. Castro, PR: Fundação ABC; 2015 [acesso em 13 de julho de 2015]. Disponível em: http://fundacaoabc.org/docs/relatorio_anual/2015.pdf.

Geerts S, Raes D, Garcia M, Miranda R, Cusicanqui JA, Taboada C, Mendoza J, Huanca R, Mamani A, Condori O, Mamani J, Morales B, Osco V, Steduto P. Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. Agronomy Journal. 2009; 101:498-508.

Grable AR, Siemer EG. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corns roots. Soil Science Society of America Proceedings. 1968; 32:180-186.

Gregorich EG, Carter MR, Angers DA, Monreal CM, Ellert BH. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. Canadian Journal of Soil Science. 1994; 367-375.

Gubiani PI, Reinert DJ, Reichert JM. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. Ciência Rural. 2006; 36:664-668.

Hillel D. Solo e água: fenômeno e princípios físicos. Porto alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970.

Hsiao TC, Heng L, Steduto P, Rojas-Lara B, Raes D, Ferers E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parametrization and testing for maize. *Agronomy Journal*. 2009; 101:448-459.

Iqbal MA, Shen Y, Stricevic R, Pei H, Sun H, Amiri E, Penas A, Rio S. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*. 2014; 135:61-72.

Jensen ME. Water consumptions by agricultural plants. In: Kozlowsky TT, editor. *Water deficits and plant growth*. New York: USDA; 1968. p.1-22.

Kiehl EJ. Manual de edafologia. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979.

Lal R. Water management in various crop production systems related to soil. *Soil and Tillage Reserarch*. 1994; 30:169-185.

Lapsch IF, Belinazzi JR R, Bertolini D, Espindola CR. Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 1991.

Libardi PL. Dinâmica da água no solo. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2005.

Lin HS, McInnes KJ, Wilding LP, Hallmark CT. Effects of soil morphology on hydraulic properties II: Hydraulic pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal*. 1999; 63:955-961.

Liu WT, Botner DM, Sakamoto CM. Aplicação de Ceres mayze model to yield prediction of a Brazilian maize hybrid. *Agricultura and Forest Meteorology*. 1989; 45:229-312.

Magalhães PC. Fisiologia da produção de milho. Sete Lagoas, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2006.

Marcolin CD. Propriedades físicas de Nitossolo e Latossolo argilosos sob plantio direto [dissertação]. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo; 2006.

Matzenauer R, Bergamaschi H, Berla TO, Riboldi J. Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*. 1995; 1:225-241.

Mello A, Caimi LL. Simulação na validação de sistemas computacionais para agricultura de precisão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2008; 12:666-675.

Mesquita MGBF, Moraes SO. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural*. 2004; 34:963-969.

Mkhabela MS, Bullock PR. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*. 2012; 110:16-24.

Nelson WL, Dale RF. Effect of trend or technology variables and record period on prediction of corn yields with weather variables. *Journal of Applied Meteorology*. 1978; 177:926-933.

Oliveira LB, Ribeiro MR, Jacomine PKT, Rodrigues JJV, Marques FA. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*. 2002; 26:315-323.

Paredes P, Wei Z, Liu Y, Xu D, Xin Y, Zhang B, Pereira LS. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. *Agricultural Water Management*. 2015; 152:57-71.

Pavan W, Fernandes JMC, Hölbis CA, Fraisse CW. Padrões de projeto aplicados a modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*. 2009; 1:15-29.

Pessoa MCPY, Luchiarini Júnior A, Fernandes EN, Lima MA. Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA; 1997.

Prevedello CL. Programa Splintex para estimar a curva de retenção de água a partir da granulometria (composição) do solo. Versão 1.0. Curitiba: UFPR, 1999.

Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: chapter 1. Roma: FAO; 2009.

Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop 4.0 – The FAO crop model to simulate yield response to water: chapter 3. Roma: FAO; 2012.

Reichardt K, Timm LC. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri, 2004.

Reinert DJ, Reichert JM. Propriedades físicas do solo. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

Scanlon BR, Nicot JP, Massmann JW. Soil gas movement in unsaturated systems. *Soil Physics Companion*. 2002; 1:297-341.

Scheraiber CF. Adaptação metodológica para a estimativa e caracterização das relações hídricas como suporte ao planejamento agrícola [dissertação]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2012.

Scheraiber CF. Adaptação metodológica para a estimativa e caracterização das relações hídricas como suporte ao planejamento agrícola [dissertação]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2012.

Scherpinski C, Uribe-opazo MA, Vilas Boas MA.; Sampaio, S.C. & Johann, J.A. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. *Acta Scientiarum Agronomy*. 2010; 32:7-13.

Sentelhas PC, Faria RT, Chaves MO, Hoogenboom G. Avaliação dos geradores de dados meteorológicos WGEN e SIMMETEO, nas condições tropicais e subtropicais brasileiras, usando modelos de simulação de culturas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 2001; 9:357-376.

Soil Survey Division Staff. Soil survey manual. Soil Conservation Service U.S. Department of Agriculture Handbook. 1993.

Souza JLM, Gerstemberger E, Araujo MA. Calibração de modelos agrometeorológicos para estimar a produtividade da cultura do trigo, considerando sistemas de manejo do solo, em Ponta Grossa-PR. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 2013; 28:409-418.

Steduto P, Hsiao TC, Raes D, Fereres E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 2009; 101:426-437.

Steduto P, Raes D, Hsiao TC, Fereres E, Hen L, Izzi G, Hoogeveen J. AquaCrop: A new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes*. 2008; 80:285-292.

Stone LF, Silveira PM, Moreira JAA. Atributos físico-hídricos do solo sob plantio direto. Santo Antônio de Goiás, Embrapa arroz e feijão, 2006.

Thompson LM. Weather and technology in the production of corn in the U.S. *Agronomy Journal*. 1969; 61:453-456.

Tojo-sole RC, Folegatti MV, Faria RT. Uso do modelo CERES-Maize para identificação de características genéticas desejáveis e de práticas adequadas de manejo em milho “safrinha” e determinação de práticas adequadas de manejo em condições de risco climático. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 2001; 9:339-346.

Tormena CA, Silva AP, Libardi PL. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*. 1998; 22:573-581.

Van Genuchten MT. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1980; 44:892-898.

Whisler FD, Acock B, Baker DN, Fye RE, Hodges HF, Lambert JR, Lemmon HE, Mckinion JM, Reddy VR. Crop simulation models in agronomic systems. *Advanced Agronomy*. 1986; 40:141-208.

Willmott CJ. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorology Society*. 1982; 63:1309-1313.

Willmott CJ. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorology Society*. 1982; 63:1309-1313.

APÊNDICE 1 – DETERMINAÇÃO DA TEXTURA DO SOLO COM O MÉTODO DO DENSÍMETRO (Adaptado de Embrapa, 1997):

- Reagentes: Hidróxido de sódio 1 mol L⁻¹ e; Fenolftaleína;
- Materiais: copos de vidro de 300 ml com tampa, bastão de vidro, peneira malha 0,053 mm e malha 2 mm, funil de diâmetro de 20 cm, proveta de 1000 ml, copos plásticos de 300 ml, recipiente metálico para estufa;
- Equipamentos: agitador elétrico, cronômetro, densímetro, balança de precisão e estufa;
- Procedimento: macerar as amostras de solo, secar em estufa a 105 °C por 24 horas (TFSE) e resfriar em dessecador. Transferir 50 g de solo (TFSE) para copo de vidro com tampa, adicionar 100 ml de água e 25 ml de solução de hidróxido de sódio 1 M. Agitar com bastão e deixar o copo tampado em repouso durante a noite. Inserir copos em agitador elétrico e proceder a agitação durante 15 minutos para solos argilosos ou de textura média e 5 minutos para arenosos. Peneirar o conteúdo em peneira de malha de 0,053 mm, colocada sobre um funil fixado sobre proveta de 1000 ml. Lavar o material retido na peneira com água e completar até o menisco de aferimento. Agitar a suspensão durante 20 segundos com um bastão de vidro. Iniciar cronometragem logo após agitação. Para a prova em branco, colocar o dispersante utilizado em proveta de 1 litro, completar o volume até o menisco, agitar durante 20 segundos e iniciar cronometragem. Após 90 minutos de sedimentação, transferir o volume da suspensão (primeiros centímetros abaixo do traço do aferimento) para copo plástico. Introduzir o densímetro e efetuar a leitura com aproximação de 0,25 (FIGURA A1.1). Se houver dificuldade na leitura do densímetro, colocar 2 a 3 gotas de fenolftaleína junto à haste. Proceder à leitura da prova em branco e anotar. Lavar a areia retida na peneira de 0,053 mm com jato forte de água. Transferir a fração areia para recipiente de alumínio numerada e de massa conhecida, eliminar o excesso de água e colocar na estufa. Após secagem (3 a 5 horas), esfriar e pesar com aproximação de 0,05 gramas, obtendo-se assim a massa da areia grossa e areia fina. Transferir fração para peneira de malha de 0,2 mm (nº 70), sobre recipiente metálico de mesmo diâmetro e separar a areia grossa. Passar a areia fina para o recipiente de alumínio usado anteriormente e pesar;

– Cálculos:

$$T_{arg} = (L_d \pm L_{Br}) \cdot 20$$

$$T_{af} = \alpha_f \cdot 20$$

$$T_{ag} = (\alpha_t - \alpha_f) \cdot 20$$

$$T_s = 1000 - (T_{arg} + T_{ag} + T_{af}) \cdot 20$$

Sendo: T_{arg} – teor de argila (g kg^{-1}); L_d – leitura no densímetro; L_{Br} – leitura na prova em branco; T_{af} – teor de areia fina (g kg^{-1}); T_{ag} – teor de areia grossa (g kg^{-1}); T_s – teor de silte (g kg^{-1}); α_t – areia total (g); α_f – areia fina (g).

FIGURA A1.1 – REALIZAÇÃO DO MÉTODO DO DENSÍMETRO EM LABORATÓRIO PARA DETERMINAÇÃO DE TEXTURA DO SOLO.



FONTE: A autora (2016)

REFERÊNCIAS

Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro, 1997.

APÊNDICE 2 – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DE PARTÍCULAS DO SOLO COM O MÉTODO DO BALÃO VOLUMÉTRICO MODIFICADO (Adaptado de Gubiani et al., 2006):

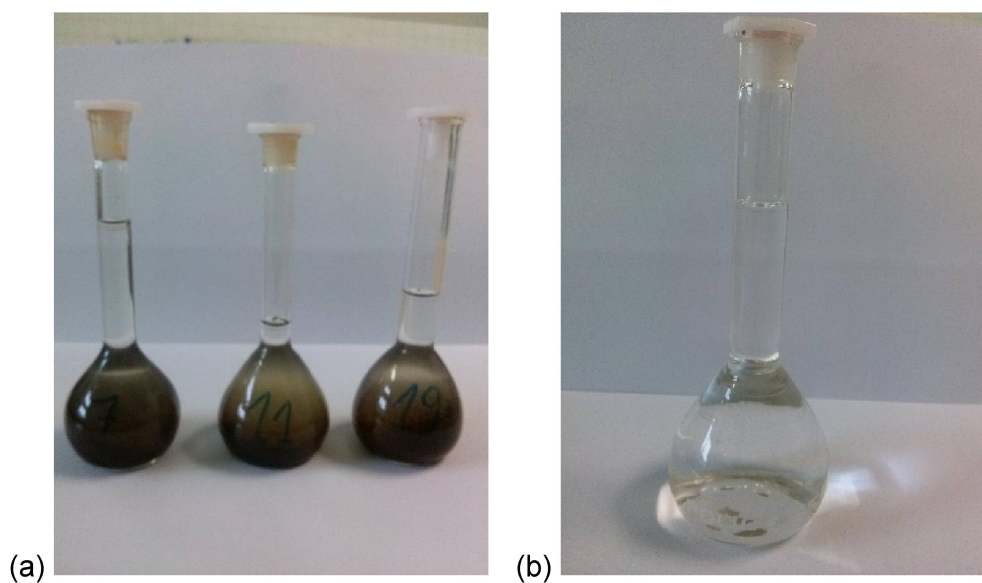
- Reagente: álcool etílico (92 °GL);
- Materiais: balão volumétrico de 50 ml e bureta;
- Equipamentos: estufa e balança de precisão;
- Procedimento: macerar as amostras de solo, secar em estufa a 105 °C por 24 horas (TFSE) e resfriar em dessecador. Medir a massa do balão volumétrico seco. Transferir aproximadamente 20 g de TFSE para o balão volumétrico e pesar a massa do balão mais solo. Adicionar álcool etílico (92 °GL) na bureta e transferir o álcool da bureta até a metade do volume do balão contendo solo. Agitar manualmente até eliminação do ar existente entre as partículas do solo. Completar o volume do balão com álcool até o menisco de aferição. Ajustar novamente o volume do álcool com o menisco de aferição do balão, gotejando-se álcool com uso de bureta (FIGURA A2.1a). Pesar o balão contendo o solo mais o álcool. Determinar a massa específica do álcool adicionando-o em balão volumétrico de massa previamente conhecida, até ajustar a sua capacidade e tomando-se a massa do álcool contido no balão (FIGURA A2.1b). Realizar a média de quatro repetições para a determinação da massa específica do álcool;
- Cálculos:

$$\rho_a = \frac{M_a}{V_b}$$

$$\rho_{ps} = \frac{M_{bs} - M_b}{50 - \left(\frac{M_{bsa} - M_{bs}}{\rho_a} \right)}$$

Sendo: ρ_a – massa específica do álcool (g cm^{-3}); M_a – massa de álcool (g); V_b – volume do balão (cm^{-3}); ρ_{ps} – massa específica de partículas do solo (g cm^{-3}); M_b – massa do balão volumétrico (g); M_{bs} – massa do balão volumétrico contendo o solo (g); M_{bsa} – massa do balão volumétrico contendo solo mais álcool (g).

FIGURA A2.1 – MÉTODO DO BALÃO VOLUMÉTRICO MODIFICADO PARA DETERMINAÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DO SOLO: a) BALÕES VOLUMÉTRICOS CONTENDO SOLO E ÁLCOOL; b) BALÃO VOLUMÉTRICO CONTENDO ÁLCOOL PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO ÁLCOOL.



FONTE: A autora (2016)

REFERÊNCIAS

Gubiani, PI, Reinert DJ, REICHERT JM. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. *Ciência Rural*, 2006, 36:664-668.

APÊNDICE 3 – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO SOLO COM O MÉTODO DO ANEL VOLUMÉTRICO (Adaptado de Embrapa, 1997):

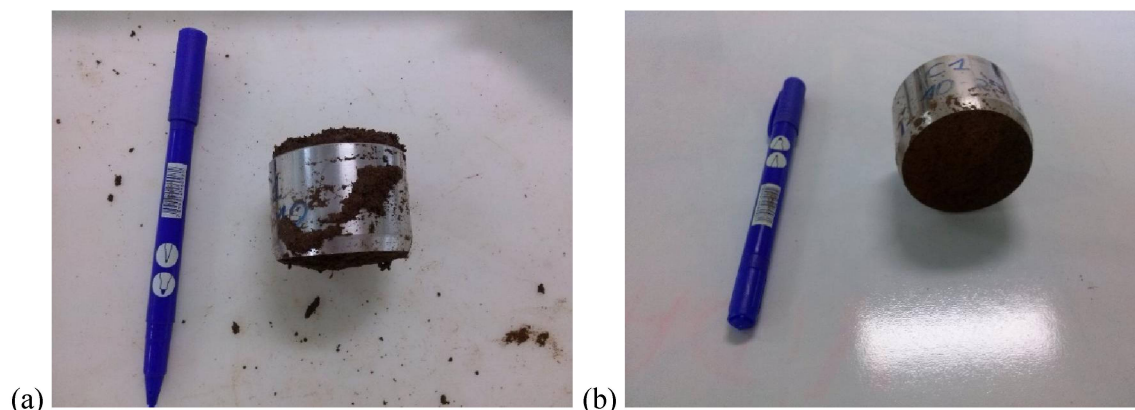
- Materiais: anel de aço (Kopecky) de bordas cortantes;
- Equipamentos: paquímetro eletrônico, estufa e balança de precisão;
- Procedimento: aferir o diâmetro e altura do anel volumétrico com paquímetro. Coletar amostra indeformada de solo cravando o anel na profundidade de solo desejada. Realizar a toalete da amostra em laboratório (FIGURA A3.1). Colocar conjunto de anel e amostra em estufa a 105 °C por 48 horas e pesar após total resfriamento. Retirar a amostra de solo do anel e pesar a massa de solo;
- Cálculos:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V}$$

Sendo: V – Volume do anel (cm^3); D – diâmetro do anel (cm); h – altura do anel; ρ_s – massa específica do solo (g cm^{-3}); m_s – massa de solo seco (g).

FIGURA A3.1 – AMOSTRA INDEFORMADA DE SOLO, COLETADA COM ANEL VOLUMÉTRICO, PARA DETERMINAÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA DO SOLO: a) ANTES DA TOALETE DA AMOSTRA; b) APÓS TOALETE DA AMOSTRA.



FONTE: A autora (2016)

REFERÊNCIAS

Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro, 1997.

APÊNDICE 4 – DETERMINAÇÃO DA UMIDADE NA CAPACIDADE DE CAMPO COM O MÉTODO DA MESA DE TENSÃO, PARA DETERMINAÇÃO DA MICROPOROSIDADE DO SOLO (Adaptado de Embrapa, 1997):

- Materiais: anel de aço (Kopecky) de bordas cortantes, placa de Petri, papel mata-borrão e tela metálica de malha 0,25 mm;
- Equipamentos: mesa de tensão na altura de 60 cm, estufa e balança de precisão;
- Procedimento: limpar a lâmina de vidro da mesa de tensão e colocar a tela metálica de malha 0,25 mm e dimensão de 40 x 40 cm, de forma centralizada. Colocar uma folha de papel mata-borrão com dimensões de 45 x 45 cm centralizada e manter o frasco a 60 cm de altura. Adicionar 500 ml de uma suspensão coloidal proveniente da determinação de argila. Colocar a segunda e terceira folha do papel. Realizar teste de funcionamento da mesa de tensão. Cobrir a base inferior dos cilindros metálicos com um pedaço de poliéster e prender com um elástico. Colocar os anéis volumétricos com as amostras em bandeja com água para saturar por 24 horas e pesar. Colocar as amostras saturadas sobre o papel mata-borrão (FIGURA A4.1), cobrir com bandeja de plástico e abaixar o frasco até o desnível de 60 cm entre o orifício de saída de água e a base da mesa de tensão, formando sucção correspondente a 60 cm de altura de coluna de água. Após 24 horas pesar as amostras, repetindo a operação por mais tempo caso não se obtenha estabilização dos pesos (pesos constantes). Verificar se não houve quebra da coluna de água. Em seguida colocar o cilindro em placa de Petri, pesar e transferir para a estufa a 105 °C. Após 48 horas, pesar e determinar o peso do bloco seco;
- Cálculos:

$$\theta_{cc} = \frac{m_{60} - m_{as}}{V}$$

Sendo: θ_{cc} – umidade na capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); m_{60} – massa da amostra após equilíbrio quando submetida a tensão de 60 cm de coluna de água; m_{as} – massa da amostra seca (g); V – volume do anel (cm^{-3}).

FIGURA A4.1 – AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLO, COLETADA COM ANEL VOLUMÉTRICO, EM MESA DE TENSÃO DE 60 cm DE COLUNA DE ÁGUA, PARA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE NA CAPACIDADE DE CAMPO.



FONTE: A autora (2016)

REFERÊNCIAS

Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro, 1997.

APÊNDICE 5 – DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO, COM O MÉTODO DO PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE (Adaptado de Embrapa, 1997):

- Materiais: anel de aço (Kopecky) de bordas cortantes, pissete e copos de 500 ml;
- Equipamentos: Permeâmetro de carga constante e cronômetro;
- Procedimento: colocar, na extremidade inferior do anel volumétrico com a amostra, um pedaço de tecido tipo poliéster e prender com um elástico. Fixar um anel volumétrico igual na parte superior do anel com a amostra, prendendo com fita adesiva impermeável. Colocar o conjunto em cuba com água para saturação do solo por 24 horas. Transferir o conjunto para o suporte do permeâmetro. O percolado é coletado em copos de 500 ml de massa previamente mensurada. Nivelar o tubo do reservatório de modo que a parte inferior fique em nível com a boca do anel, para manter a carga hidráulica constante (FIGURA A5.1a). Com o auxílio de um pissete, colocar água cuidadosamente nos anéis presos sobre a amostra até atingir a saída de água do permeâmetro. Abrir a saída de água do permeâmetro e iniciar cronometragem (FIGURA A5.1b). Medir com proveta o volume percolado após 1 hora;
- Cálculos:

$$K_{SAT} = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t}$$

Sendo: K_{SAT} – condutividade hidráulica saturada (cm h^{-1}); Q – volume percolado (ml); L – altura do bloco do solo (cm); H – altura do bloco do solo e da coluna de água sobre a amostra (cm); A – área do cilindro (cm^2); t – tempo (horas).

FIGURA A5.1 – MÉTODO DO PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE PARA DETERMINAÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO: a) AJUSTE DO NÍVEL DE ÁGUA NA SUPERFÍCIE DA COLUNA DE ÁGUA SOBRE O ANEL VOLUMÉTRICO; E, b) CONJUNTO DE ANÉIS COM PERMEÂMETRO EM FUNCIONAMENTO.



(a)



(b)

FONTE: A autora (2016)

REFERÊNCIAS

Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro, 1997.

APÊNDICE 6 – ATRIBUTOS FÍSICOS-HÍDRICOS DOS SOLOS DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DA FUNDAÇÃO ABC

TABELA A6.1 – TEORES DE AREIA, SILTE, AREIA FINA, AREIA GROSSA E AREIA TOTAL, MASSA ESPECÍFICA DO SOLO (ρ_s), MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DE SOLO (ρ_{ps}), POROSIDADE TOTAL (α), MICROPOROSIDADE, MACROPOROSIDADE, UMIDADE VOLUMÉTRICA NO PONTO DE MURCHA PERMANENTE (θ_{PMP}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA CAPACIDADE DE CAMPO (θ_{CC}), CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL (CAD) E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (K_{sat}), EM TRÊS CAMADAS DE SOLOS DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE ARAPOTI, FUNDAÇÃO ABC.

Local	Camada	----- Textura (g kg ⁻¹) -----					ρ_s	ρ_{ps}	α	Microporos	Macroporos	θ_{PMP}	θ_{CC}	CAD	K_{sat}
	(cm)	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total	---- (kg m ⁻³) ----			----- (m ³ m ⁻³) -----				(mm)	(mm dia ⁻¹)
Arapoti	0,0-0,10	325	75	197	403	600	1342	2583	0,53	0,38	0,15	0,18	0,38		1017
Arapoti	0,10-0,25	388	25	221	366	588	1312	2674	0,48	0,33	0,15	0,19	0,32	63,18	967
Arapoti	0,25-0,40	350	50	198	402	600	1209	2622	0,52	0,34	0,18	0,19	0,34		1017
Arapoti	0,0-0,10	325	75	211	389	600	1337	2544	0,50	0,37	0,13	0,17	0,37		1017
Arapoti	0,10-0,25	313	88	195	405	600	1447	2562	0,43	0,30	0,13	0,14	0,30	57,04	1017
Arapoti	0,25-0,40	350	50	199	401	600	1255	2554	0,41	0,24	0,16	0,15	0,24		1017
Arapoti	0,0-0,10	313	88	194	406	600	1389	2593	0,46	0,34	0,12	0,15	0,34		1017
Arapoti	0,10-0,25	300	88	183	430	613	1350	2560	0,49	0,31	0,18	0,15	0,31	58,27	1117
Arapoti	0,25-0,40	363	38	204	396	600	1191	2623	0,53	0,31	0,22	0,19	0,30		1017
Arapoti	0,0-0,10	238	63	207	493	700	1659	2583	0,52	0,35	0,17	0,13	0,35		2144
Arapoti	0,10-0,25	263	75	187	475	663	1406	2555	0,46	0,29	0,17	0,13	0,29	64,68	1621
Arapoti	0,25-0,40	275	88	194	443	638	1309	2620	0,46	0,26	0,20	0,13	0,26		1345
Arapoti	0,0-0,10	250	75	192	483	675	1290	2553	0,46	0,29	0,17	0,12	0,28		1779
Arapoti	0,10-0,25	263	75	202	460	663	1455	2637	0,49	0,30	0,19	0,13	0,29	69,29	1621
Arapoti	0,25-0,40	288	88	177	448	625	1423	2617	0,51	0,35	0,16	0,16	0,35		1226
Média		306,9	69	197	427	624	1358,3	2592,0	0,5	0,3	0,2	0,2	0,3	62,5	1262,6
Desvio Padrão		44,3	20	11	38	35	115,3	38,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	362,5
Coeficiente de variação		14,4	29	6	9	6	8,5	1,5	7,5	12,3	16,5	16,1	12,8	8,0	28,7

FONTE: A autora (2016)

TABELA A6.2 – TEORES DE AREIA, SILTE, AREIA FINA, AREIA GROSSA E AREIA TOTAL, MASSA ESPECÍFICA DO SOLO (ρ_s), MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DE SOLO (ρ_{ps}), POROSIDADE TOTAL (α), MICROPOROSIDADE, MACROPOROSIDADE, UMIDADE VOLUMÉTRICA NO PONTO DE MURCHA PERMANENTE (θ_{PMP}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA CAPACIDADE DE CAMPO (θ_{CC}), CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL (CAD) E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (K_{sat}), EM TRÊS CAMADAS DE SOLOS DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE CASTRO, FUNDAÇÃO ABC.

Local	Camada	----- Textura (g kg ⁻¹) -----					ρ_s	ρ_{ps}	α	Microporos	Macroporos	θ_{PMP}	θ_{CC}	CAD	K_{sat}
	(cm)	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total	---- (kg m ⁻³) ----			----- (m ³ m ⁻³) -----				(mm)	(mm dia ⁻¹)
Castro	0,0-0,10	563	138	53	247	300	1101	2460	0,62	0,50	0,12	0,38	0,49		374
Castro	0,10-0,25	625	113	53	210	263	1250	2467	0,58	0,48	0,10	0,38	0,47	46,18	331
Castro	0,25-0,40	663	88	47	203	250	1129	2601	0,68	0,50	0,18	0,36	0,50		317
Castro	0,0-0,10	550	88	58	305	363	1128	2508	0,60	0,49	0,11	0,37	0,49		460
Castro	0,10-0,25	538	113	48	302	350	993	2501	0,63	0,44	0,19	0,28	0,43	56,79	441
Castro	0,25-0,40	625	88	49	239	288	892	2552	0,66	0,43	0,23	0,27	0,43		359
Castro	0,0-0,10	488	163	118	232	350	972	2438	0,68	0,52	0,16	0,34	0,52		441
Castro	0,10-0,25	588	100	90	222	313	1090	2454	0,60	0,51	0,10	0,37	0,51	55,81	390
Castro	0,25-0,40	638	113	72	178	250	924	2589	0,59	0,44	0,15	0,32	0,43		317
Castro	0,0-0,10	613	88	83	217	300	1074	2533	0,62	0,51	0,11	0,39	0,51		374
Castro	0,10-0,25	663	100	60	178	238	1028	2580	0,56	0,45	0,11	0,34	0,45	46,87	305
Castro	0,25-0,40	650	100	41	209	250	967	2609	0,61	0,47	0,14	0,35	0,47		317
Castro	0,0-0,10	450	200	89	261	350	1019	2513	0,61	0,52	0,10	0,33	0,51		441
Castro	0,10-0,25	513	188	71	229	300	873	2653	0,63	0,47	0,16	0,27	0,47	65,10	374
Castro	0,25-0,40	638	113	75	175	250	971	2542	0,56	0,42	0,14	0,31	0,42		317
Média		587,0	120	67	227	294	1027,4	2533,3	0,6	0,5	0,1	0,3	0,5	54,2	370,5
Desvio Padrão		66,9	37	21	40	44	102,0	64,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8	54,0
Coeficiente de variação		11,4	31	31	18	15	9,9	2,5	6,0	7,1	27,7	11,9	7,3	14,5	14,6

FONTE: A autora (2016)

TABELA A6.3 – TEORES DE AREIA, SILTE, AREIA FINA, AREIA GROSSA E AREIA TOTAL, MASSA ESPECÍFICA DO SOLO (ρ_s), MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DE SOLO (ρ_{ps}), POROSIDADE TOTAL (α), MICROPOROSIDADE, MACROPOROSIDADE, UMIDADE VOLUMÉTRICA NO PONTO DE MURCHA PERMANENTE (θ_{PMP}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA CAPACIDADE DE CAMPO (θ_{CC}), CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL (CAD) E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (K_{sat}), EM TRÊS CAMADAS DE SOLOS DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE ITABERÁ, FUNDAÇÃO ABC.

Local	Camada	----- Textura (g kg ⁻¹) -----					ρ_s	ρ_{ps}	α	Microporos	Macroporos	θ_{PMP}	θ_{CC}	CAD	K_{sat}
	(cm)	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total	---- (kg m ⁻³) ----			----- (m ³ m ⁻³) -----				(mm)	(mm dia ⁻¹)
Itaberá	0,0-0,10	488	138	217	158	375	1231	2584	0,54	0,38	0,17	0,21	0,37		479
Itaberá	0,10-0,25	538	75	220	168	388	1293	2619	0,47	0,37	0,10	0,26	0,37	56,80	500
Itaberá	0,25-0,40	550	100	217	133	350	1149	2600	0,52	0,36	0,16	0,20	0,36		441
Itaberá	0,0-0,10	638	88	123	152	275	1161	2709	0,59	0,46	0,13	0,37	0,46		345
Itaberá	0,10-0,25	638	88	146	129	275	1212	2682	0,55	0,40	0,15	0,25	0,40	51,17	345
Itaberá	0,25-0,40	650	100	137	113	250	1112	2709	0,57	0,42	0,15	0,28	0,41		317
Itaberá	0,0-0,10	463	50	197	290	488	1059	2613	0,59	0,35	0,24	0,27	0,34		695
Itaberá	0,10-0,25	575	75	156	194	350	1152	2680	0,54	0,37	0,17	0,22	0,36	48,87	441
Itaberá	0,25-0,40	588	63	150	200	350	1193	2639	0,54	0,36	0,17	0,22	0,36		441
Itaberá	0,0-0,10	513	75	144	268	413	1331	2643	0,50	0,40	0,10	0,26	0,40		543
Itaberá	0,10-0,25	525	50	162	263	425	1298	2559	0,53	0,38	0,15	0,28	0,38	52,66	565
Itaberá	0,25-0,40	525	113	137	225	363	1216	2529	0,53	0,36	0,17	0,19	0,35		460
Itaberá	0,0-0,10	488	113	157	243	400	1351	2610	0,53	0,42	0,11	0,26	0,41		521
Itaberá	0,10-0,25	513	125	154	208	363	1123	2617	0,59	0,37	0,22	0,19	0,36	64,46	460
Itaberá	0,25-0,40	538	113	157	193	350	1197	2605	0,53	0,35	0,18	0,19	0,34		441
Média		548,7	91	165	196	361	1205,2	2626,5	0,5	0,4	0,2	0,2	0,4	54,8	466,3
Desvio Padrão		58,0	27	32	54	62	84,2	51,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,1	95,1
Coeficiente de variação		10,6	29	19	28	17	7,0	2,0	6,2	8,1	24,9	19,9	8,6	11,2	20,4

FONTE: A autora (2016)

TABELA A6.4 – TEORES DE AREIA, SILTE, AREIA FINA, AREIA GROSSA E AREIA TOTAL, MASSA ESPECÍFICA DO SOLO (ρ_s), MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DE SOLO (ρ_{ps}), POROSIDADE TOTAL (α), MICROPOROSIDADE, MACROPOROSIDADE, UMIDADE VOLUMÉTRICA NO PONTO DE MURCHA PERMANENTE (θ_{PMP}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA CAPACIDADE DE CAMPO (θ_{CC}), CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL (CAD) E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (K_{SAT}), EM TRÊS CAMADAS DE SOLOS DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE PONTA GROSSA, FUNDAÇÃO ABC.

Local	Camada	----- Textura (g kg ⁻¹) -----					ρ_s	ρ_{ps}	α	Microporos	Macroporos	θ_{PMP}	θ_{CC}	CAD	K_{sat}
	(cm)	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total	---- (kg m ⁻³) ----			----- (m ³ m ⁻³) -----				(mm)	(mm dia ⁻¹)
Ponta-Grossa	0,0-0,10	363	138	252	249	500	1423	2529	0,50	0,41	0,09	0,19	0,40		724
Ponta-Grossa	0,10-0,25	413	100	239	249	488	1422	2535	0,45	0,36	0,09	0,19	0,35	57,91	695
Ponta-Grossa	0,25-0,40	463	88	226	224	450	997	2581	0,55	0,35	0,20	0,26	0,34		614
Ponta-Grossa	0,0-0,10	400	100	231	269	500	1301	2513	0,49	0,34	0,15	0,20	0,34		724
Ponta-Grossa	0,10-0,25	413	100	226	262	488	1177	2558	0,50	0,35	0,15	0,21	0,34	48,06	695
Ponta-Grossa	0,25-0,40	450	100	226	224	450	972	2606	0,53	0,35	0,18	0,24	0,34		614
Ponta-Grossa	0,0-0,10	375	100	224	301	525	1254	2623	0,53	0,41	0,12	0,21	0,40		786
Ponta-Grossa	0,10-0,25	388	88	228	297	525	1129	2607	0,54	0,33	0,21	0,21	0,32	54,84	786
Ponta-Grossa	0,25-0,40	400	100	203	297	500	1174	2540	0,53	0,35	0,18	0,22	0,35		724
Ponta-Grossa	0,0-0,10	375	100	204	321	525	1375	2560	0,49	0,39	0,10	0,19	0,38		786
Ponta-Grossa	0,10-0,25	350	113	235	302	538	1401	2511	0,50	0,37	0,13	0,18	0,36	69,12	820
Ponta-Grossa	0,25-0,40	450	88	162	301	463	1184	2619	0,51	0,39	0,11	0,23	0,39		640
Ponta-Grossa	0,0-0,10	363	150	230	257	488	1231	2503	0,54	0,44	0,10	0,20	0,43		695
Ponta-Grossa	0,10-0,25	400	125	222	253	475	1222	2612	0,52	0,37	0,16	0,21	0,36	59,76	667
Ponta-Grossa	0,25-0,40	475	88	208	229	438	969	2569	0,58	0,39	0,19	0,28	0,38		589
Média		405,2	105	221	269	490	1215,4	2564,4	0,5	0,4	0,1	0,2	0,4	57,9	703,9
Desvio Padrão		38,9	19	21	32	31	154,5	41,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	70,7
Coeficiente de variação		9,6	18	9	12	6	12,7	1,6	6,0	8,3	28,8	12,9	8,3	13,2	10,0

FONTE: A autora (2016)

TABELA A6.5 – TEORES DE AREIA, SILTE, AREIA FINA, AREIA GROSSA E AREIA TOTAL, MASSA ESPECÍFICA DO SOLO (ρ_s), MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DE SOLO (ρ_{ps}), POROSIDADE TOTAL (α), MICROPOROSIDADE, MACROPOROSIDADE, UMIDADE VOLUMÉTRICA NO PONTO DE MURCHA PERMANENTE (θ_{PMP}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA CAPACIDADE DE CAMPO (θ_{CC}), CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL (CAD) e CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (K_{sat}), EM TRÊS CAMADAS DE SOLOS DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE SOCAVÃO, FUNDAÇÃO ABC.

Local	Camada	----- Textura (g kg ⁻¹) -----					ρ_s	ρ_{ps}	α	Microporos	Macroporos	θ_{PMP}	θ_{CC}	CAD	K_{sat}
	(cm)	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total	---- (kg m ⁻³) ----			----- (m ³ m ⁻³) -----				(mm)	(mm dia ⁻¹)
Socavão	0,0-0,10	550	150	63	237	300	1187	2330	0,57	0,44	0,12	0,32	0,44		374
Socavão	0,10-0,25	625	75	65	235	300	1154	2416	0,58	0,46	0,13	0,37	0,45	42,92	374
Socavão	0,25-0,40	563	113	60	265	325	1081	2215	0,60	0,44	0,16	0,31	0,44		407
Socavão	0,0-0,10	650	100	59	191	250	1188	2504	0,55	0,45	0,09	0,36	0,45		317
Socavão	0,10-0,25	613	88	75	225	300	1001	2215	0,59	0,40	0,19	0,25	0,39	63,21	374
Socavão	0,25-0,40	675	75	62	188	250	959	2369	0,58	0,40	0,18	0,18	0,39		317
Socavão	0,0-0,10	513	288	47	153	200	1132	2246	0,55	0,41	0,14	0,25	0,41		269
Socavão	0,10-0,25	638	113	65	185	250	992	2559	0,61	0,41	0,19	0,24	0,40	68,84	317
Socavão	0,25-0,40	638	50	88	225	313	982	2397	0,62	0,40	0,21	0,21	0,40		390
Socavão	0,0-0,10	563	163	97	178	275	1018	2266	0,61	0,41	0,19	0,26	0,41		345
Socavão	0,10-0,25	613	113	105	170	275	1043	2265	0,61	0,43	0,17	0,27	0,43	59,94	345
Socavão	0,25-0,40	663	100	96	142	238	1044	2414	0,60	0,42	0,17	0,28	0,42		305
Socavão	0,0-0,10	550	150	113	187	300	1082	2307	0,59	0,44	0,15	0,23	0,43		374
Socavão	0,10-0,25	600	125	101	174	275	998	2463	0,58	0,37	0,21	0,20	0,36	66,83	345
Socavão	0,25-0,40	600	113	114	173	288	1046	2368	0,56	0,37	0,19	0,22	0,36		359
Média		603,6	121	81	195	276	1060,5	2355,6	0,6	0,4	0,2	0,3	0,4	60,3	347,5
Desvio Padrão		47,1	55	22	35	33	74,7	105,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	10,3	36,9
Coeficiente de variação		7,8	46	28	18	12	7,0	4,5	3,8	6,5	20,7	21,3	7,1	17,1	10,6

FONTE: A autora (2016)

TABELA A6.6 – TEORES DE AREIA, SILTE, AREIA FINA, AREIA GROSSA E AREIA TOTAL, MASSA ESPECÍFICA DO SOLO (ρ_s), MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS DE SOLO (ρ_{ps}), POROSIDADE TOTAL (α), MICROPOROSIDADE, MACROPOROSIDADE, UMIDADE VOLUMÉTRICA NO PONTO DE MURCHA PERMANENTE (θ_{PMP}), UMIDADE VOLUMÉTRICA NA CAPACIDADE DE CAMPO (θ_{CC}), CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL (CAD) E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (K_{sat}), EM TRÊS CAMADAS DE SOLOS DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE PONTA GROSSA, FUNDAÇÃO ABC.

Local	Camada	----- Textura (g kg ⁻¹) -----					ρ_s	ρ_{ps}	α	Microporos	Macroporos	θ_{PMP}	θ_{CC}	CAD	K_{sat}
	(cm)	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total	---- (kg m ⁻³) ----			----- (m ³ m ⁻³) -----				(mm)	(mm dia ⁻¹)
Tibagi	0,0-0,10	600	213	116	72	188	907	2577	0,64	0,38	0,26	0,11	0,37		258
Tibagi	0,10-0,25	663	188	91	59	150	975	2680	0,57	0,41	0,16	0,37	0,40	72,98	228
Tibagi	0,25-0,40	688	175	85	52	138	923	2637	0,62	0,40	0,22	0,10	0,38		219
Tibagi	0,0-0,10	613	213	107	68	175	1037	2555	0,59	0,41	0,18	0,35	0,40		248
Tibagi	0,10-0,25	675	175	89	61	150	1069	2570	0,61	0,46	0,15	0,29	0,45	56,85	228
Tibagi	0,25-0,40	638	213	92	58	150	1062	2640	0,70	0,49	0,21	0,29	0,48		228
Tibagi	0,0-0,10	613	213	107	68	175	1099	2641	0,58	0,42	0,16	0,34	0,41		248
Tibagi	0,10-0,25	625	200	103	72	175	1053	2593	0,59	0,33	0,26	0,12	0,32	45,95	248
Tibagi	0,25-0,40	663	175	100	63	163	996	2643	0,61	0,46	0,15	0,40	0,45		238
Tibagi	0,0-0,10	600	225	101	74	175	1011	2554	0,72	0,54	0,18	0,42	0,53		248
Tibagi	0,10-0,25	650	188	94	68	163	1103	2573	0,61	0,48	0,13	0,39	0,48	27,64	238
Tibagi	0,25-0,40	675	175	84	66	150	987	2600	0,51	0,37	0,15	0,34	0,36		228
Tibagi	0,0-0,10	625	213	82	80	163	931	2533	0,53	0,32	0,21	0,32	0,36		238
Tibagi	0,10-0,25	675	175	82	68	150	900	2582	0,60	0,39	0,21	0,19	0,37	38,84	228
Tibagi	0,25-0,40	663	188	81	69	150	978	2618	0,56	0,41	0,15	0,36	0,40		228
Média		644,4	195	94	67	161	1002,1	2599,7	0,6	0,4	0,2	0,3	0,4	48,5	236,7
Desvio Padrão		29,9	18	11	7	14	67,6	41,7	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	17,3	11,1
Coeficiente de variação		4,6	9	12	11	9	6,7	1,6	9,2	14,3	22,1	37,3	13,8	35,8	4,7

FONTE: A autora (2016)

